



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 141584

ANALISIS KEGAGALAN BAUT PENGUNCI PELAT TRUNNION PADA KOMPARTMEN 1 BALL MILL VI TUBAN III PT. SEMEN INDONESIA TBK

INGGIL HANIDYA
NRP. 2713 100 014

Dosen Pembimbing
Lukman Noerochim, S.T., M.Sc. Eng., PhD
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017



TUGAS AKHIR - TL141584

ANALISIS KEGAGALAN BAUT PENGUNCI PELAT TRUNNION PADA KOMPARTMEN 1 BALL MILL VI TUBAN III PT. SEMEN INDONESIA TBK

INGGIL HANIDYA
NRP 2713 100 014

Dosen Pembimbing
Lukman Noerochim, S.T., M.Sc. Eng., PhD.
Wikan Jatimurti, S.T.,M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

FAILURE ANALYSIS OF TIGHT FITTING TRUNNION BOLT AT COMPARTMENT 1 AT BALL MILL VI TUBAN III PLANT PT. SEMEN INDONESIA TBK

**INGGIL HANIDYA
NRP 2713 100 014**

**Advisor :
Lukman Noerochim, S.T., M.Sc. Eng., PhD.
Wikan Jatimurti, S.T.,M.Sc.**

**MATERIALS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2017**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS KEGAGALAN BAUT PENGUNCI PELAT
TRUNNION PADA KOMPARTMEN 1 BALL MILL VI
TUBAN III PT. SEMEN INDONESIA TBK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Material Dan Metalurgi
pada
Bidang Studi Korosi Dan Kegagalan Material
Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Oleh :
INGGIL HANIDYA
NRP. 2713 100 014**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Lukman Noerochim, S.T., M.Sc. Eng., PhD (Pembimbing 1)
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. (Pembimbing 2)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Analisis Kegagalan Baut Pengunci Pelat Trunnion pada Kompartmen 1 Ball Mill VI Tuban III PT. Semen Indonesia TBK

Nama : Inggil Hanidya
NRP : 2713100014
Jurusan : Departemen Material FTI ITS
Dosen Pembimbing : Lukman Noerochim, S.T., M.Sc. Eng., PhD
Co-Pembimbing : Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Abstrak

Trunnion liner berfungsi untuk melindungi dinding bagian dalam pada *inlet chute* dari tumbukan grinding ball dan material yang masuk. *Trunnion liner* ini dikaitkan dengan *mill head shell* kompartmen 1 dan *trunnion plate* menggunakan baut pengunci pelat *trunnion*, baut pengunci pelat *trunnion* ini sering mengalami kegagalan. Hipotesa awal, baut pengunci pelat *trunnion* ini kemungkinan mengalami kegagalan lelah. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa penyebab terjadinya kegagalan pada baut pengunci pelat *trunnion ball mill* dan untuk membuktikan hipotesa awal tersebut. Pengujian yang dilakukan untuk menguji material ini adalah meliputi uji komposisi, pengamatan makroskopik, uji SEM, uji metalografi, dan uji kekerasan dan uji titik kritis menggunakan software *inventor*. Dari hasil uji komposisi didapatkan material baut pengunci memiliki komposisi yang sama dengan standar baut ISO 898-1 grade 10.9, Kemudian dari uji kekerasan ini diperoleh data rata-rata nilai kekerasan pada daerah yang mengalami kegagalan sebesar 364,8 HV, dan pada daerah yang jauh dari kegagalan sebesar 353,8 HV. Hasil dari permodelan diperoleh pemusatan tegangan yang tinggi pada badan baut. Analisa struktur mikro dan fraktografi menunjukkan pola patah lelah akibat tegangan yang berulang pada baut pengunci dan pemasangan pelat *trunnion* yang telah mengalami deformasi sehingga rentan terjadi inisiasi *crack*.

Kata kunci : *Trunnion, Bolt, Ball Mill, Patah Lelah*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Failure Analysis of Tight Fitting Trunnion Plate Bolt in Compartment I at Ball Mill VI Tuban III Plant PT. Semen Indonesia TBK

Name : Inggil Hanidya
NRP : 2713100014
Major : Materials Engineering Department
Advisor : Lukman Noerochim, S.T., M.Sc. Eng., PhD
Co-Advisor : Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Abstract

Trunnion liner serves to protect the inner wall of the inlet chute from the collision grinding ball and incoming material. This trunnion liner is associated with first compartment and trunnion plate mill heads using a tight fitting trunnion bolt, tight fitting trunnion bolt often fails. The initial hypothesis, tight fitting trunnion bolt is likely to fail due to fatigue failure. In this study was conducted to analyze the cause of failure on the trunnion ball mill trunk latch and to prove the initial hypothesis. Tests carried out to test this material include the composition test, macroscopic observation, SEM test, metallographic test, and hardness test and critical point test using inventor software. From the composite test results, the tight fitting bolt material has the same composition as the ISO 898-1 grade 10.9 bolt standard. Then from this hardness test we get the average data of hardness value in the failed area of 364,8 HV, and in the far area From failure of 353,8 HV. The results of the model obtained high stress on the bolt body that failed. Analysis of micro and frachtography shows a fractured pattern of fatigue failure due to the high repetitive stress on the tight fitting bolt and the installation of trunnion plates that have been deformed and therefore susceptible to crack initiation.

Keywords : Trunnion, Bolt, Ball Mill, Fatigue Failure

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, tidak lupa shalawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir. Tugas Akhir ditujukan untuk memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Departemen Teknik Material Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), penulis telah menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul **“Analisis Kegagalan Baut pengunci Pelat *Trunnion* pada Kompartment 1 Ball Mill VI Tuban III PT. Semen Indonesia TBK”**.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan, diantaranya:

1. Kedua Orang Tua, dan keluarga yang telah mendukung secara moril maupun materiil serta doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan dan keselamatan anaknya.
2. Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI-ITS.
3. Lukman Noerochiem, S.T., M.Sc. Eng., PhD selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bekal yang sangat bermanfaat.
4. Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. selaku co dosen Pembimbing yang telah banyak membanyak memberikan ilmu.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI-ITS.
6. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material.
7. Bapak Apriyo Edi Kuswoyo dan Bapak Yanuari Kurniawan, selaku pembimbing di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.

8. Keluarga MT 15 yang banyak memberikan saya pengalaman berharga selama di Departemen Teknik Material.
9. Dan seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi dalam Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan laporan ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik yang membangun dari pembaca demi perbaikan dan kemajuan bersama. Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat dan dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya

Surabaya, 13 Juli 2017

Penulis,
Inggil Hanidya

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Ball Mill	5
2.1.1 Komponen <i>Tube Mill</i>	7
2.2 Mill Trunnion Liner	8
2.3 Baut.....	8
2.4 Baja.....	11
2.5 Analisa Kegagalan	12
2.6 Prosedur dalam Analisa Kegagalan.....	14
2.7 Patah Getas dan Patah Ulet	15
2.7.1 Patah Ulet.....	16
2.7.2 Patah Getas	20
2.8 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah.....	22
2.8.1 Tahap Retak Awal (<i>Crack Initiation</i>)	23
2.8.2 Tahap Perambatan Retak (<i>Crack Propagation</i>).....	24
2.9 Patah Akhir (<i>Final Fracture</i>) dari Patah Lelah ..	24
2.10 Persamaan <i>Beach Marks</i> dan Striasi	27
2.11 Perbedaan <i>Beach Marks</i> dan Striasi	28

2.12	Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kelelahan Logam	28
2.13	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	29
2.14	Uji Kekerasan Vickers	30
2.15	Bainite.....	30
2.16	Penelitian Sebelumnya	33
BAB III METODOLOGI		
3.1	Diagram Alir Penelitian	37
3.2	Metode Penelitian	38
3.3	Material yang digunakan.....	38
3.3.1	Material	38
3.3.2	Spesimen	39
3.4	Peralatan	40
3.5	Tahapan Penelitian.....	40
3.5.1	Review Dokumen Perusahaan.....	40
3.5.2	Uji Komposisi	41
3.5.3	Pengamatan Makroskopik	41
3.5.4	Pengamatan SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)	42
3.5.5	Uji Metalografi.....	42
3.5.6	Uji Kekerasan	43
3.6	Rancangan Penelitian	44
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		
4.1	Analisis Data.....	45
4.1.1	Record Baut Pengunci Pelat <i>Trunnion</i> pada <i>Ball Mill</i>	45
4.1.2	Hasil Uji Komposisi.....	46
4.1.3	Hasil Pengamatan Makroskopik.....	49
4.1.4	Hasil Pengamatan Mikroskop Stereo ...	51
4.1.5	Hasil Pengamatan <i>Scanning electron Microscopy</i> (SEM)	53
4.1.6	Hasil Uji Metalografi	57
4.1.7	Hasil Uji Kekerasan	59
4.1.8	Hasil Analisa Titik Kritis	64
4.2	Pembahasan	65

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	xxiii
LAMPIRAN.....	xxvii
BIODATA PENULIS	xxxvii

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	(a) Mesin <i>ball mill</i> (b) skema mesin <i>ball mill</i>	5
Gambar 2.2	Diafragma dan <i>grinding ball</i> pada <i>ball mill</i>	6
Gambar 2.3	<i>Trunnion</i> pada <i>ball mill</i> (1) <i>trunnion</i> (2) <i>tight fitting trunnion bolt</i> (3) <i>mill head</i> (4) <i>trunnion liner</i> (5) <i>bearing liner</i>	8
Gambar 2.4	Terminologi ulir pada baut	10
Gambar 2.1	Pembebanan pada baut berdasarkan hubungan antara arah gaya dengan luas area yang mengalami gaya	11
Gambar 2.6	Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan	16
Gambar 2.7	(a) Bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi <i>necking</i> , (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis ...	17
Gambar 2.8	Tahap patahan cup dan cone (a) awal <i>necking</i> (b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan <i>cavity</i> hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan	17
Gambar 2.9	(a) Patah ulet (<i>cup and cone</i>) pada aluminium, dan (b) patah getas pada <i>mild steel</i>	18
Gambar 2.10	(a) SEM yang menunjukkan <i>spherical dimple</i> karakteristik, patahan hasil beban tarik <i>uniaxial</i> , 3300×, dan (b) SEM yang menunjukkan <i>spherical dimple</i> karakteristik hasil beban geser, 5000x	19
Gambar 2.11	(a) Foto yang menunjukkan bentuk V “chevron” sebagai karakteristik patah getas dan (b) foto yang menunjukkan permukaan patah getas daerah asal retakan	20
Gambar 2.12	(a) Skema perambatan retak yang melewati butir (<i>transgranular</i>) (b) hasil SEM dari patah secara <i>transgranular</i>	21

Gambar 2.13	(a) Skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (<i>intergranular</i>) (b) hasil SEM dari patah secara <i>intergranular</i> 21
Gambar 2.14	Fase-fase kegagalan lelah 22
Gambar 2.15	Model untuk pengintian retak 23
Gambar 2.16	Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan kecil (e) beban tekan maksimum (f) beban tarik kecil 24
Gambar 2.17	Skema permukaan patah kegagalan <i>fatigue</i> dengan penampang lingkaran 26
Gambar 2.18	Skema permukaan patah kegagalan fatigue dengan penampang persegi 27
Gambar 2.19	Struktur mikro bainit dari baja paduan rendah yang telah mengalami perlakuan panas 31
Gambar 2.20	Perbedaan <i>upper bainit</i> (B ₁) (kiri), dan <i>lower bainit</i> (B ₂) (kanan) 32
Gambar 2.21	Struktur mikro granular bainit 32
Gambar 2.22	Axel baja karbon-sedang dengan fraktur kelelahan di sebagian besar penampang sebelum pecah akhir 33
Gambar 2.23	Pembagian posisi pengujian kekerasan 34
Gambar 2.24	Struktur mikro baut dengan perbesaran 200x ... 35
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian 37
Gambar 3.2	(a) Bagian baut pengunci yang patah (c) baut pengunci yang masih terpasang 39
Gambar 3.3	(a) Daerah yang digunakan untuk pengujian pada baut baru (b) daerah yang digunakan untuk pengujian pada baut patah (c) potongan permukaan baut pengunci patah 39
Gambar 3.4	Mesin <i>OES FOUNDRY-MASTER PRO</i> 41
Gambar 3.5	(a) Kamera digital merk Sony (b) <i>Stereomicroscope</i> 32
Gambar 3.6	Mikroskop optik <i>Olympus BX51M-RF</i> 43

Gambar 3.7	<i>Universal Hardness Tester HBRV 187.5A</i>	44
Gambar 4.1	Letak baut pengunci pelat <i>trunnion</i> pada <i>ball mill</i>	45
Gambar 4.2	Desain baut pengunci pelat <i>trunnion</i>	46
Gambar 4.3	Pengamatan visual baut pengunci pelat <i>trunnion</i> (a) pengamatan baut gagal yang terpasang pada pelat <i>trunnion</i> (b) pengamatan <i>wear</i> pada baut pengunci (c) pengamatan permukaan patahan baut pengunci	49
Gambar 4.4	Pengamatan <i>crack initiation</i> dengan mikroskop stereo perbesaran 8 kali	51
Gambar 4.5	Pengamatan <i>crack propagation</i> dengan mikroskop stereo perbesaran 8 kali	52
Gambar 4.6	Pengamatan <i>crack propagation</i> menjalar ke arah <i>final fracture</i> dengan mikroskop stereo perbesaran 8 kali	52
Gambar 4.7	Pengamatan patah akhir (<i>final fracture</i>) dengan mikroskop stereo perbesaran 8 kali	53
Gambar 4.8	(a) Pengamatan SEM pada <i>crack initiation</i> 250x ; (b) pengamatan SEM pada <i>crack</i> <i>initiation</i> perbesaran 400x	54
Gambar 4.9	(a) Pengamatan SEM pada <i>crack</i> <i>propagation</i> 250x ; (b) pengamatan SEM pada <i>crack propagation</i> perbesaran 400x	55
Gambar 4.10	(a) Pengamatan SEM pada <i>final crack</i> perbesaran 400x ; (b) pengamatan SEM pada <i>final crack</i> perbesaran 1000x.....	56
Gambar 4.11	Struktur mikro baut pengunci baru ISO 898-1 grade 10.9; (a) perbesaran 1000x (b) perbesaran 500x	58

Gambar 4.12	Struktur mikro baut pengunci gagal ISO 898-1 grade 10.9; (a) perbesaran 1000x (b) perbesaran 500x	59
Gambar 4.13	Skema indentasi pembebanan kekerasan pada potongan melintang	60
Gambar 4.14	Perbandingan angka kekerasan baut pengunci pelat <i>trunnion</i> pada potongan melintang	61
Gambar 4.15	Skema indentasi pembebanan kekerasan pada potongan membujur dari daerah yang dekat dari patah hingga daerah yang jauh dengan patahan	62
Gambar 4.16	Perbandingan angka kekerasan baut pengunci pelat <i>trunnion</i> pada potongan membujur	63
Gambar 4.17	(a) Skema pembebanan (b) hasil simulasi pembebanan pada baut pengunci (c) hasil simulasi pada baut pengunci pandangan membujur	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Permasalahan dalam Kegagalan Komponen Mesin	12
Tabel 2.2	Kasus Kegagalan Material akibat Perawatan Komponen Mesin	13
Tabel 2.3	Penyebab Kegagalan Dalam Komponen Mesin	14
Tabel 2.4	Hasil Pengujian Kekerasan	35
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian	44
Tabel 4.1	Dimensi Baut Pengunci Pelat <i>Trunnion</i> PT. Semen Indonesia	46
Tabel 4.2	Data Operasi <i>Ball Mill</i> pada <i>Finish Mill 3</i> PT. Semen Indonesia	46
Tabel 4.3	Perbandingan Hasil Uji Komposisi Kimia Baut Pengunci dengan ISO 898-1 grade 10.9 ...	47
Tabel 4.4	Perbandingan Hasil Uji Komposisi Kimia Baut Pengunci dengan ISO 898-1 grade 8.8	48
Tabel 4.5	Hasil Uji Kekerasan Vickers pada Potongan Melintang dengan Pembebanan 100 Kgf	60
Tabel 4.6	Hasil Uji Kekerasan Vickers pada Potongan Membujur dengan Pembebanan 100 Kgf	62

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Semen Indonesia yang dulu PT. Semen Gresik merupakan pabrik produsen semen terbesar di Indonesia. Diresmikan di Gresik pada tanggal 7 Agustus 1957 oleh Presiden Republik Indonesia yang pertama dengan kapasitas terpasang 250.000 ton per tahun. Pada tanggal 20 Desember 2012, melalui Rapat Umum Pemegang Saham Luar Biasa (RUPSLB) perseroan, resmi mengganti nama dari PT Semen Gresik (Persero) Tbk, menjadi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. (PT Semen Indonesia TBK, 2017)

Semen sendiri terdiri atas bahan baku utama dan bahan baku tambahan jika ditinjau dari segi fungsinya. Material yang termasuk bahan baku utama adalah batu kapur (C_aCO_3), *Clay* (tanah liat), pasir silika (SiO_2), *iron sand* (Fe_2O_3). Serta bahan baku tambahan dari semen adalah *trass*, *gypsum* dan dolomit. Proses produksi semen yang pertama yaitu penambangan bahan baku untuk pembuatan semen terutama batu kapur (C_aCO_3) dan *Clay* (tanah liat) menggunakan alat-alat berat kemudian dikirim ke pabrik, yang kedua, bahan-bahan yang telah ditambang kemudian diteliti di laboratorium kemudian dicampur dengan proporsi yang tepat dan kemudian dilanjutkan ke proses penggilingan awal (*raw mill*) untuk memperkecil dimensi material. Proses selanjutnya adalah bahan kemudian dipanaskan di *preheater*, dilanjutkan di dalam *kiln* sehingga bereaksi membentuk kristal *clinker* (terak). Kristal *clinker* ini kemudian didinginkan di *cooler* dengan bantuan angin. Panas dari proses pendinginan ini di alirkan lagi ke *preheater* untuk menghemat energi. *clinker* ini kemudian dihaluskan lagi dalam tabung yang berputar yang bersisi bola-bola baja yaitu pada *ball mill* sehingga menjadi serbuk semen yang halus. *Clinker* yang telah halus disimpan dalam silo. Dari silo ini semen di *packing* dan dijual ke konsumen. (Semen Padang, 2006)

Pabrik semen memiliki komponen penunjang salah satunya adalah *ball mill*. *Ball mill* merupakan alat pada proses



penggilingan akhir serta mencampurkan *clinker* (terak) dengan bahan tambahan (aditif). *Ball mill* atau biasa disebut *horizontal mill* atau *tube mill* pada PT Semen Indonesia (persero) Tbk terdiri dari dua kompartemen yang berkapasitas total sebesar 215 ton per jam. Di dalam kompartemen 1 terdapat *trunnion liner*. *Trunnion liner* berfungsi untuk melindungi dinding bagian dalam pada pelat *trunnion* yang berfungsi sebagai *inlet chute* dari tumbukan *grinding ball* dan material yang masuk. *Trunnion liner* ini dikaitkan dengan *mill head shell* kompartemen 1 dan *trunnion plate* menggunakan baut pengunci pelat *trunnion*.

Baut atau *bolt* merupakan elemen mesin dengan alur heliks pada permukaan yang berfungsi untuk mengikat dua atau lebih komponen (*fastener*) yang bersifat *nonpermanent*, artinya, *fastener* ini dapat dibongkar pasang untuk melepas elemen-elemen mesin yang digabungkan. Baut dapat dikencangkan dan dilepas dengan memberikan torsi pada kepala baut atau pada *nut*.

Pada 9 Januari 2017, Baut pengunci pelat *trunnion* yang digunakan dalam mesin *ball mill 6 plant* tuban III PT. Semen Indonesia (persero) Tbk ditemukan mengalami kegagalan/patah pada badan baut. Biasanya kegagalan pada baut pada umumnya disebabkan oleh ausnya ulir pada baut, kegagalan akibat kelelahan (*fatigue*) pada baut, baut kelebihan beban akibat gaya yang diaplikasikan, tegangan yang berlebihan dibawah mur baut baik pada kepala baut maupun pada *joint* baut itu sendiri, dan kekuatan penguncian baut yang tidak sesuai standar. (Hire Torque, 2015).

Baut pengunci ini memiliki usia harapan sekitar 5 tahun, tetapi kenyataanya baut hanya berumur 1 bulan. Hal ini menjadi kendala bagi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk, sebab menghambat proses produksi dan sangat merugikan karena untuk penggantian baut pengunci, mesin *ball mill* harus dihentikan pengoperasiannya sehingga terjadi kerugian waktu dan jumlah produksi. Oleh karena itu diperlukan analisa kegagalan pada baut pengunci pelat *trunnion*. Sehingga kegagalan tersebut tidak terulang kembali dan dapat meningkatkan produksi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.



1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah :

1. Faktor apa saja yang menyebabkan kegagalan baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill*?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan pada baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill*?
3. Bagaimana mengatasi kegagalan yang terjadi pada baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill*?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan yaitu pengaruh lingkungan diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill*.
2. Menentukan mekanisme kegagalan baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill*.
3. Menganalisa solusi dari kegagalan yang terjadi pada baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill* agar tidak terjadi kerusakan lagi.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat kepada semua pihak yang berkaitan, yaitu mahasiswa sebagai pelaksana penelitian dapat lebih mengaplikasikan dan memahami ilmu di bidang material dan metalurgi terutama pada analisa kegagalan. Serta PT Semen Indonesia (Persero) Tbk sebagai penyokong utama penelitian dapat menerapkan hasil penelitian untuk mengetahui penyebab dari kegagalan dari baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill* dan sebagai acuan untuk mendapatkan solusi agar



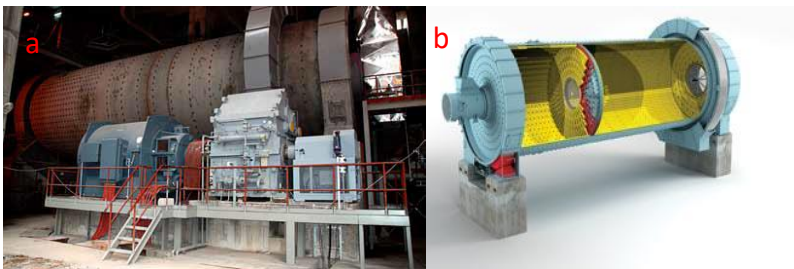
kegagalan pada baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill* dapat ditanggulangi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ball Mill

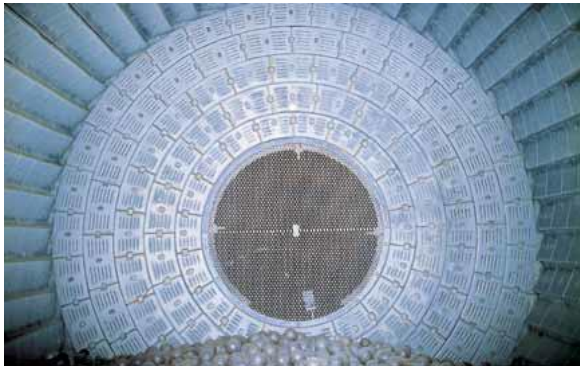
Ball mill atau *tube mill* dirancang untuk penggilingan klinker, gipsum dan komponen aditif kering atau basah untuk semua jenis semen, gambar mesin *ball mill* dan skema mesin *ball mill* ditunjukkan pada Gambar 2.1. *Mill* dapat beroperasi pada *open circuit* maupun *close circuit* dan dengan penggilingan awal atau tanpa penggilingan awal untuk mencapai penggilingan yang efektif dan efisien dalam hal produksi produk. *Ball mill* mempunyai area aliran yang besar, yang memungkinkan untuk beroperasi dengan volume aliran udara yang besar dan penurunan tekanan yang rendah pada *mill*. Oleh karena itu konsumsi energi pada kipas ventilasi rendah. Pada dua kompartmen pada *mill* semen, yang pertama, kompartmen penggilingan kasar (*coarse grinding compartment*) terdapat *step lining* yang cocok untuk media penggilingan yang besar dan memberi gaya angkat pada muatan material pada *mill*. *Shell lining* pada kompartmen kedua adalah *liner* bergelombang dirancang untuk mendapatkan penyerapan daya maksimum dan efisiensi penggilingan.



Gambar 2.1 (a) Mesin *ball mill* (b) skema mesin *ball mill*
(FLSmith, 2010)



Grinding ball terdiri dari grinding media berbentuk bola dengan berbagai ukuran untuk memastikan efisiensi penggilingan yang optimal dan mudah dalam perawatan dan perbaikan. Distribusi ukuran *grinding media* pada kompartmen penggilingan kasar (*coarse grinding compartment*) adalah untuk menghancurkan partikel kasar pada *mill feed material* sehingga menghasilkan ukuran material yang memadai untuk melewati diafragma *mill*. Untuk penggilingan halus, media penggilingan terdiri dari bola yang lebih kecil ukurannya, yang menyebabkan kemungkinan efisiensi penggilingan terbaik tanpa menghalangi aliran material melalui muatan bola *grinding media*. Diafragma diantara *grinding* kompartmen satu dan *grinding* kompartmen dua efektif menyaring material dari penggilingan kasar kompartmen satu ke penggilingan halus kompartmen dua, ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diafragma dan *grinding ball* pada *ball mill*
(FLSmith, 2010)

Jika material yang akan digrinding mengandung lebih banyak air dari yang bisa dikeringkan pada kompartmen satu, *mill* akan menggunakan pengering kompartmen dengan pengangkat. Operasi *mill* dipantau dengan menggunakan pengukuran dan perhitungan secara terus - menerus dari material, temperatur udara



dan juga tekanan pada *mill exit*. Tingkat material pada *mill* dipantau menggunakan alat elektronik (*electronic ear*) yang mengukur tingkat emisi kebisingan pada *mill*. Untuk *ballmill* dengan sistem operasi sistem tertutup, putaran muatan material dipantau dengan menimbang dari aliran *reject material* dari *separator*. (FLSmith, 2010)

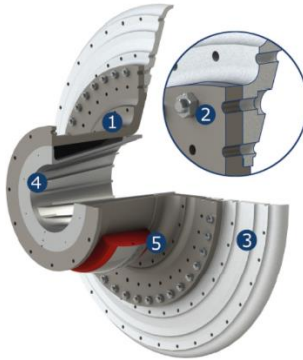
2.1.1 Komponen *Tube Mill*

Tube mill terdiri dari berbagai komponen yang mempunyai fungsi dan berkaitan satu sama lain, diantaranya :

1. *Inlet* 1 (pada *mill head*) , dan *Inlet* II
2. *Mill Shell*
3. *Mill Head*
4. *Mill bearing* (*slide shoe bearing* dan *trunnion bearing*)
5. *Mill drive*
6. *Lifter* dan *liner*
7. *Center piece*
8. *Diafragma*
9. *Grinding balls*
10. *Circumferential outlet* (Ibrahim, 2013)

2.2 *Mill Trunnion Liner*

Fungsi dari *trunnion liner* adalah untuk melindungi pelat *trunnion* dari aliran material yang dimasukkan ke *ballmill*, dikarenakan sebagian dari pelat *trunnion* berkontak langsung dengan material dan *grinding ball* maka harus dilapisi *trunnion liner* agar pelat *trunnion* tidak rusak, letak *trunnion liner* dan pelat *trunnion* beserta komponennya ditunjukkan pada gambar 2.3. (*Handbook Semen Indonesia*, 2016)



Gambar 2.3 *Trunnion pada ball mill (1) trunnion (2) tight fitting trunnion bolt (3) mill head (4) trunnion liner (5) bearing liner (FLSmith, 2013)*

2.3 Baut

Baut atau *bolt* merupakan elemen mesin dengan alur heliks pada permukaan yang berfungsi untuk mengikat dua atau lebih komponen (*fastenerII*) yang bersifat *nonpermanent*, artinya, *fastener* ini dapat dibongkar pasang untuk melepas elemen-elemen mesin yang digabungkan. Baut dapat dikencangkan dan dilepas dengan memberikan torsi pada kepala baut atau pada *nut*. Berdasarkan bentuk ulirnya, secara umum baut diklasifikasikan menjadi :

1. Ulir ISO (*metric*)
Memiliki sudut antar *root* dan *crest* sebesar 60°
2. Ulir UN (*United Series*)
3. Ulir *whitworth*
4. Ulir *Trapezoidal*
5. Ulir *Buttress*

Perbedaan utama dari masing-masing bentuk ulir adalah sudut antara puncak (*crest*) atau lembah (*root*) dengan puncak atau



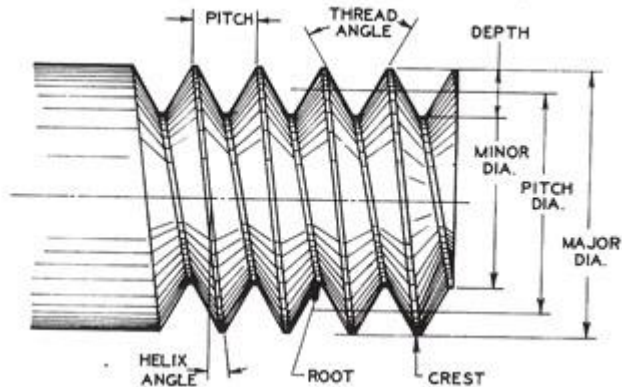
lembah terdekat. Bentuk runcing (V) pada *crest* dan *root* menyebabkan ulir sangat rentan terhadap kerusakan karena adanya konsentrasi tegangan. Oleh karena itu, ujung *crest* dan dasar *root* dibuat rata atau lengkung pada proses *forming*.

Baut memiliki terminology yang sering disebut pada Gambar 2.4

- *Pitch* : jumlah ulir dalam satu satuan panjang (mm atau inch).
- *Crest* : jarak terjauh ulir dari sumbu pusat.
- *Root* : jarak terdekat ulir dari sumbu pusatnya. Pada ulir ISO dan UN, sudut pada *root* dan *crest* sebesar 60^0 .
- *Major diameter* : diameter terbesar dari ulir yang diukur dari puncak (*crest*) ke puncak.
- *Minor diameter* : diameter terkecil dari ulir yang diukur dari pangkal (*root*) ke pangkal.
- *Lead* : jarak pergerakan ulir yang sejajar dengan sumbu saat baut diputar satu putaran. Pada *single lead*, *lead* dan *pitch* nilainya sama, sedangkan pada *double-threaded bolt*, nilai *lead* dua kali nilai *pitch*, dan seterusnya.

Semua ulir dibuat dengan aturan tangan kanan (*right-hand rule*) dengan beberapa pengecualian sehingga baut mengalami pengencangan saat diputar searah jarum jam dan sebaliknya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

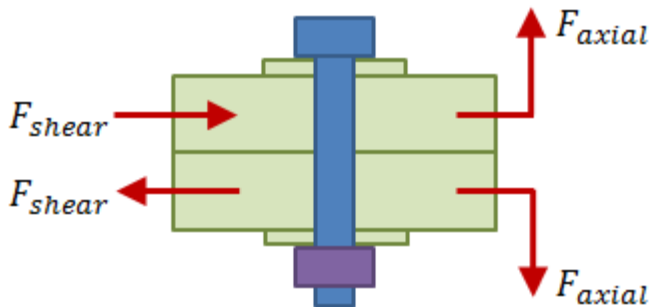


Gambar 2.4 Terminologi ulir pada baut (Despratama, 2015)

Berdasarkan hubungan antara arah gaya dengan luas area yang mengalami gaya, pembebanan yang diterima dapat dibagi menjadi :

- Tegangan axial (*axial*) : tegangan yang dihasilkan oleh gaya yang arahnya tegak lurus terhadap luasan penampang melintang.
- Tegangan geser (*shear*) : tegangan yang dihasilkan oleh gaya yang arahnya sejajar terhadap luasan penampang melintang.

Pembebanan yang diterima berdasarkan hubungan antara arah gaya dengan luas area yang mengalami gaya ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pembebanan pada baut berdasarkan hubungan antara arah gaya dengan luas area yang mengalami gaya.
(Despratama, 2015)

2.4 Baja

Baja pada dasarnya adalah paduan besi-karbon. Selain terdiri dari besi dan karbon baja biasanya juga mengandung sejumlah unsur lain, baja ini memiliki kadar karbon yang kurang dari 2%. Ada yang unsurnya ditekan serendah mungkin ataupun justru malah ditambahkan agar memperoleh suatu sifat tertentu. Menurut komposisinya baja dibagi menjadi dua kelompok, yaitu baja karbon dan baja paduan. Baja karbon yang dapat didefinisikan sebagai baja yang hanya mengandung sejumlah kecil unsur dari elemen selain dari karbon. Sedangkan baja paduan adalah paduan dari besi dengan tambahan unsur lain seperti karbon, magnesium, silikon, nikel, krom, molybdenum, dan vanadium untuk mencapai suatu sifat yang diinginkan. Baja paduan memiliki lingkup yang luas seperti *low-alloy steels*, *stainless steels*, *heat-resistant steels*, dan baja perkakas. Beberapa baja paduan seperti *austenitic stainless steels* tidak mengandung penambahan karbon yang disengaja. silikon ketika diperlukan ditambahkan sebagai *deoxidizer* pada *molten steel*. Nikel memberikan kekuatan dan bantuan pada pengerasan baja melalui *quenching* dan *tempering* dalam perlakuan panas. (Wiley, 2006)



2.5 Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan dapat diartikan sebagai pemeriksaan/pengujian terhadap komponen-komponen atau struktur yang mengalami kerusakan beserta kondisi yang menyebabkan kegagalan dengan tujuan untuk mengetahui penyebab dari kegagalan tersebut. Jadi tujuan utama dari analisa kegagalan adalah untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan serta memberikan solusi-solusi yang dapat dilaksanakan untuk menanggulangi masalah kegagalan tersebut.

Dengan kata lain, analisa kegagalan berujung pada observasi pada komponen-komponen yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makrokopis dan mikrokopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen.

Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri Faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan : (Brooks, 2002).

1. Faktor kesalahan pemilihan material

Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan material yang dominan yaitu faktor kesalahan dalam memilih material. Tabel 2.1 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam kasus kegagalan material

Tabel 2.1 Permasalahan dalam Kegagalan Komponen Mesin

Permasalahan	%
Kesalahan pemilihan material	38
Cacat produksi	15
Kesalahan perlakuan panas	15
Kesalahan desain mekanik	11
Kondisi operasi yang berlebihan	8
Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol	6
Pemeriksaan yang kurang baik	5



Material yang tidak jelas	2
---------------------------	---

2. Perawatan komponen yang kurang baik

Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.2 menunjukkan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.

Tabel 2.2 Kasus Kegagalan Material akibat Perawatan
Komponen Mesin

Permasalahan	%
Perawatan yang kurang baik	44
Cacat saat fabrikasi	17
Defisiensi desain	16
Pemakaian yang abnormal	10
Cacat material	7
Penyebab yang tidak jelas	6

3. Kesalahan dalam perancangan komponen

Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

- Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
- Kegagalan getas akibat beban kejut
- Kegagalan pada temperature tinggi (pemuluran)
- Static delayed fracture*
- Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
- Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*
- Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan.

4. Kondisi kerja yang ekstrim



Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Penyebab Kegagalan dalam Komponen Mesin

Penyebab Kegagalan	%
Korosi	29
Kelelahan (<i>fatigue</i>)	25
Kegagalan getas (<i>brittle fracture</i>)	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperature tinggi	7
Korosi retak tegang, korosi lelah, penggetasan hydrogen	6
Pemuluran (<i>creep</i>)	3
Abrasi, Erosi	3

2.6 Prosedur dalam Analisa Kegagalan

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dengan menginvestigasi dan menganalisa kegagalan komponen yang terjadi. Adapun tindakan yang perlu dilakukan dalam menginvestigasi komponen yaitu (Nishida, 1992):

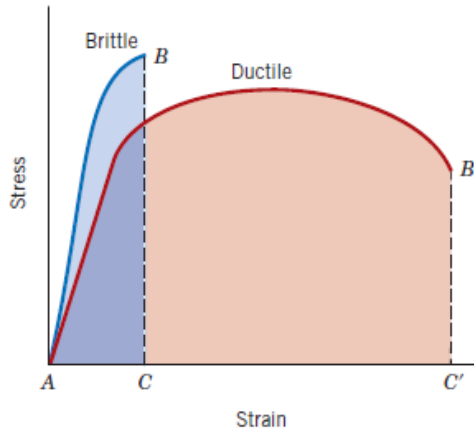
1. Material yang digunakan
 - a. Data produksi : *melting, rolling, forming, casting, heat treatment*, dan proses *machining*
 - b. Analisa kimia : pengujian X-Ray, komposisi kimia
 - c. Sifat mekanik : *tensile, bending, hardness, impact*, dan *fatigue test*.
 - d. Struktur metalurgi : struktur makro dan mikro struktur
 - e. Pengerasan permukaan dan tegangan sisa : *finishing*
 - f. Patah permukaan



2. Desain tegangan dan kondisi perawatan
 - a. Kekuatan dari luar : golongan, besar, pengulangan.
 - b. Atmospher : udara, air, air laut, dan sebagainya
 - c. Yang lain : kondisi perbaikan
3. Uji percobaan
 - a. Uji laboratorium : perhitungan tegangan (kekuatan material, *finite element method* (FEM), kekuatan leleh, kekerasan patahan.
 - b. Konfirmasi uji lapangan : ukuran tegangan, uji produksi.
4. Hasil uji seluruhnya.

2.7 Patah Getas dan Patah Ulet

Patahan adalah spesimen dari sebuah benda menjadi 2 atau lebih potongan karena terjadinya tegangan statik dan pada temperature yang relatif rendah terhadap titik leleh dari suatu material. Tegangan yang terjadi pada material bisa merupakan tegangan tarik, tegangan kompresi, tegangan geser ataupun torsi. Dalam rekayasa material terdapat dua jenis mode patahan yang mungkin terjadi yaitu patahan ulet dan patah getas. Klasifikasi jenis patahan ini berdasarkan kemampuan sebuah material dalam menerima deformasi plastis yang dapat menyerap energi yang besar sebelum terjadi patahan. Material yang ulet mempunyai deformasi plastis yang tinggi, pembentukan *small cavity* diujung retak, serta retak memanjang atau menjalar bertahap. Sedangkan pada material yang getas mempunyai deformasi plastis rendah, tegangan lokal meningkat pada ujung retak sehingga retak menjalar dengan sangat cepat. Pada Gambar 2.6 ditunjukkan diagram tegangan dan regangan dari patahan ulet dan getas.



Gambar 2.6 Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan (Callister, 2007)

Patahan ulet dan getas pada suatu material tergantung pada kondisi pembebanan. Pada proses terjadinya patahan melibatkan dua tahap yaitu terbentuknya retak dan perambatan sebagai respon dari tegangan yang dialami oleh material. Modus patahan sangat bergantung pada perambatan retak. (Callister, 2007)

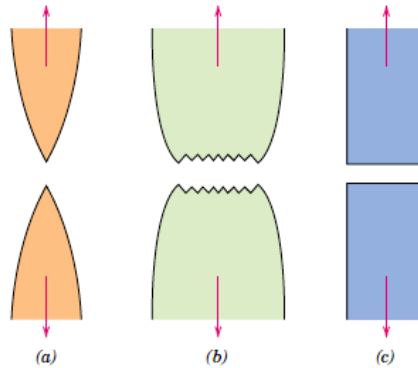
2.7.1 Patahan Ulet

Bentuk patahan ulet memiliki karakteristik yang berbeda jika diamati secara makroskopis. Pada Gambar 2.7 ditunjukkan skematik representative dari dua karakteristik profil patahan secara makro. Konfigurasi yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7 (a) ditemukan pada material lunak seperti emas pada temperature ruang dan metal, polimer dan inorganik gelas pada temperature yang relatif tinggi.

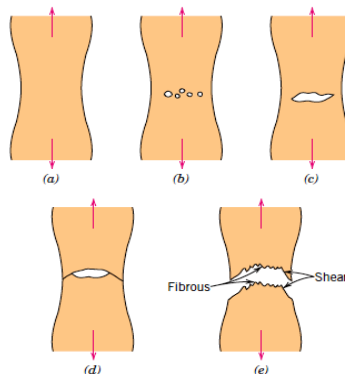
Secara umum profil patahan material ulet akibat tegangan tarik ditunjukkan pada Gambar 2.7 (b) dimana patahan didahului oleh adanya necking. Proses patahan ulet dari material terjadi dalam beberapa tahap. Pertama, setelah terjadi pengecilan luasan



setempat (*necking*) *cavities* kecil atau *microvoid* terbentuk di dalam struktur material seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8.



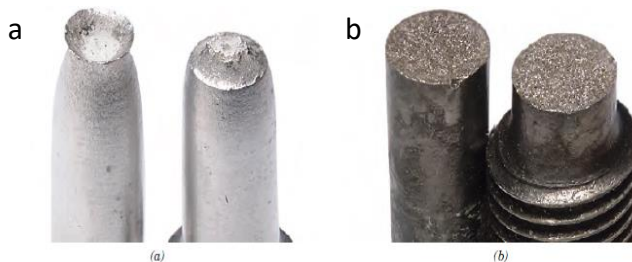
Gambar 2.7 Profil patahan (a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi *necking*, (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister, 2007)



Gambar 2.8 Tahap patahan cup dan cone (a) awal *necking*, (b) terbentuknya *cavity* kecil, (c) pengumpulan *cavity* hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan (Callister, 2007)



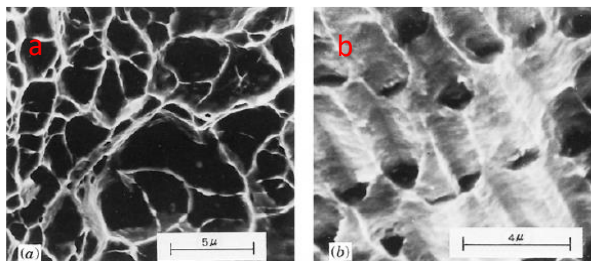
Kemudian dengan bertambahnya deformasi akibat tegangan maka *microvoid* membesar dan berkumpul menjadi satu yang kemudian *coalesce* membentuk retak secara elips yang memiliki panjang tegak lurus dari arah pembebanan. Retak kemudian tumbuh sejajar dengan arah pembebanan, akhirnya patahan terbentuk oleh perambatan retak yang cepat disekitar area *necking* seperti Gambar 2.8 (e) oleh deformasi geser pada sudut disekitar arah tegangan tarik dimana sudut ini merupakan tegangan geser tertinggi. Terkadang sebuah patahan mempunyai karakteristik kontur seperti *cup* dan *cone* karena salah satu permukaan patahan menyerupai *cone*. Spesimen yang mempunyai bentuk patahan seperti ini berbentuk *fibrous* yang tidak teratur dimana hal ini menandakan deformasi plastis. Lebih jauh lagi untuk mengetahui informasi mengenai penentuan secara pengujian dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Studi mengenai tipe patahan disebut *fractographic*. *Scanning Electron Microscope* (SEM) lebih banyak digunakan dalam mengamati bentuk crack, patahan karena mempunyai resolusi dan kedalaman observasi yang lebih tinggi dari mikroskopik optik. Gambar 2.9 menunjukkan patah ulet *cup* dan *cone* dan perbedaan patah getas pada *mild steel*



Gambar 2.9 Profil patahan (a) patah ulet (*cup and cone*) pada aluminium, dan (b) patah getas pada *mild steel* (Callister, 2007)



Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjaralan retakan mikro (*microvoids coalescence*) pada Gambar 2.10.

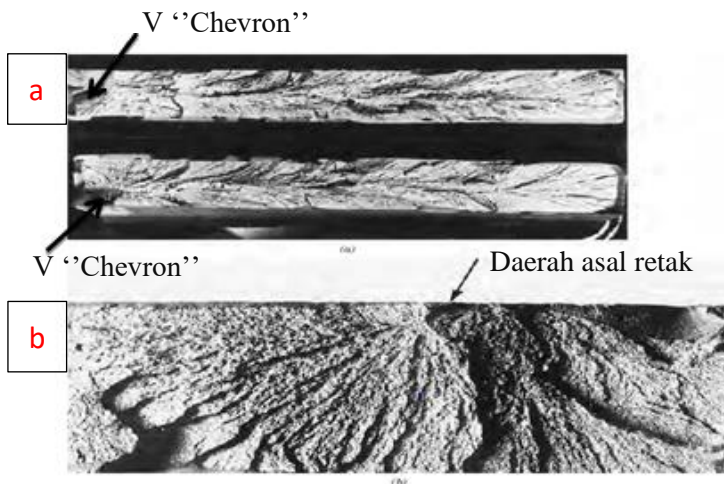


Gambar 2.10 Hasil SEM (a) menunjukkan *spherical dimple* karakteristik, patahan hasil beban tarik *uniaxial*, 3300×, dan (b) menunjukkan *spherical dimple* karakteristik hasil beban geser, 5000x (Callister, 2007)



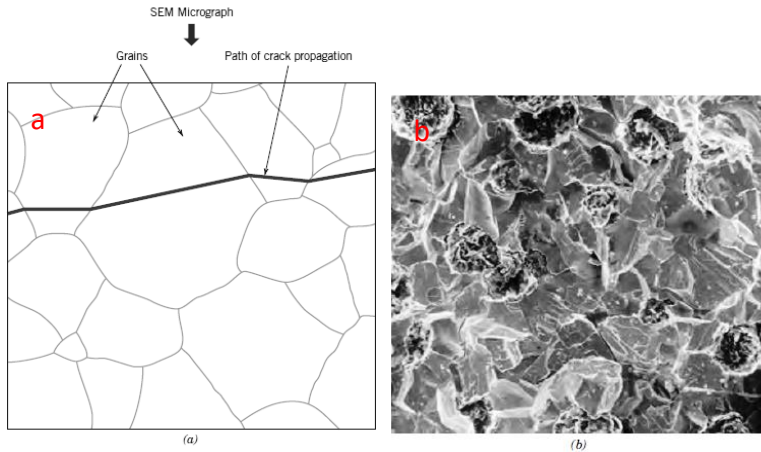
2.7.2 Patah Getas

Patah getas sering terjadi tanpa adanya atau sedikit sekali terjadi deformasi plastis pada material. Retak/ patahan merambat sepanjang bidang-bidang kristalin yang membelah atom-atom material (transgranular). Kemudian pada material lunak dengan butir kasar (coarse grain) maka dapat dilihat pola-pola yang dinamakan chevron seperti Gambar 2.11 (a) atau patah getas permukaan terlihat garis atau daerah asal retakan disebut fan pattern seperti pada Gambar 2.11 (b).

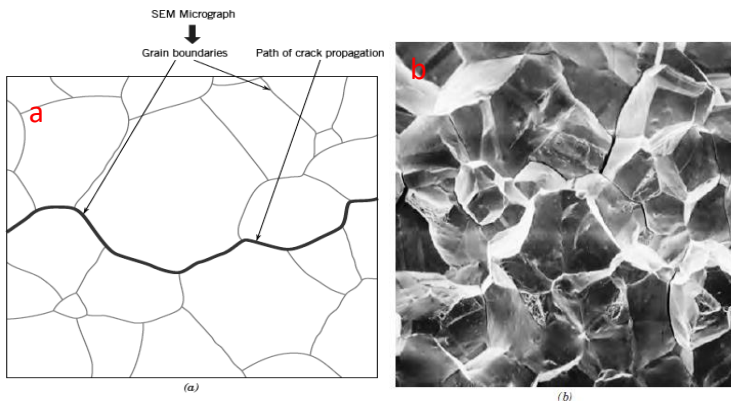


Gambar 2.11 (a) Foto yang menunjukkan bentuk V “chevron” sebagai karakteristik patah getas dan (b) Foto yang menunjukkan permukaan patah getas daerah asal retakan (Callister, 2007)

Untuk hasil perambatan dan SEM, dapat terlihat jelas untuk retak yang melewati batas butir (*transgranular*) dan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) pada Gambar 2.12 dan 2.13.



Gambar 2.12 (a) Skema perambatan retak yang melewati butir (*transgranular*) (b) hasil SEM dari patah secara transgranular (Callister, 2007)



Gambar 2.13 (a) Skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) (b) hasil SEM dari patah secara *intergranular* (Callister, 2007)



2.8 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah

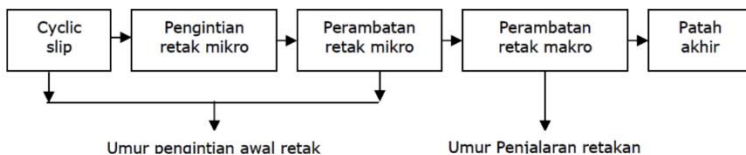
Kelelahan (*Fatigue*) adalah salah satu jenis kegagalan (patah) pada komponen akibat beban dinamis (pembebanan yang berulang-ulang atau berubah-ubah). Hingga saat ini, mekanisme patah lelah adalah terdiri atas 3 tahap kejadian yaitu:

1. Tahap awal terjadinya retakan (*crack initiation*)
2. Tahap penjararan retakan (*crack propagation*)
3. Tahap akhir (*final fracture*) (Akuan, 2007)

Proses yang terjadi dalam patah lelah adalah sebagai berikut :

1. *Cyclic plastic* deformation sebelum *fatigue crack initiation*
2. Pembentukan satu atau lebih *microcracks*
3. Perambatan atau peleburan dari *microcracks* untuk membentuk satu atau lebih *microcracks*
4. Perambatan satu atau lebih *macrocrack*
5. *Final failure* (ASM Metal Handbook vol. 19, 2002)

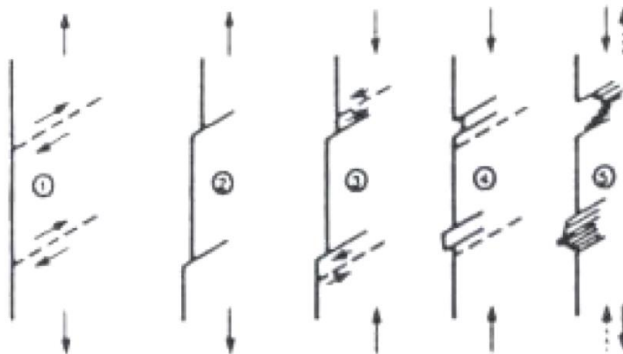
Tahapan pembentukan awal retak dan penjararan retakan dalam mekanisme kelelahan logam, membutuhkan waktu sehingga umur lelah dari komponen atau logam, ditentukan dari kedua tahap tersebut (total *fatigue life*, $NT = \text{fatigue initiation}$, $N_i + \text{fatigue propagation}$, N_p). Fase-fase yang terjadi selama kejadian kelelahan logam tersebut adalah sebagai berikut yang ditunjukkan pada Gambar 2.14: (Akuan, 2007)



Gambar 2.14 Fase-fase kegagalan lelah (Akuan, 2007)

2.8.1 Tahap Retak Awal (*Crack Initiation*)

Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam menyebabkan juga konsentrasi tegangan. Beberapa model diberikan dalam menjelaskan *fatigue crack* pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Model untuk pengintian retak (Akuan, 2007)

Pada beban tarik pertama, slip terjadi dengan membentuk permukaan bertingkat yang membentuk sudut 45° dengan sumbu tegangan. Hal ini akibat tegangan geser maksimal yang terjadi pada sudut tersebut. Pembebanan selanjutnya menyebabkan slip pada arah yang berlawanan. Slip ini terjadi pada bidang yang berdekatan dengan yang pertama. Dan selanjutnya merupakan proses pengulangan dalam pembebanan siklus yang sama. Tahap retak awal ini meliputi fase *cyclic slip*, fase pembentukan inti retak (*crack nucleation*) dan pertumbuhan retak mikro (*growth of microcrack*). (Akuan, 2007)

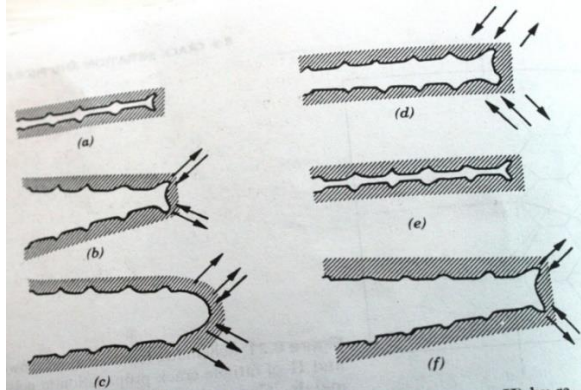
2.8.2 Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak pada suatu komponen terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material.



Hal ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung retak. Awal retakan mula-mula menjalar pada bidang slip di dalam beberapa butir dengan kecepatan yang sangat lambat. Pengamatan secara makro tidak menampakkan perambatan ini. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I.

Selanjutnya pertumbuhan retak pada tahap II ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum. Retakan mulai kelihatan dengan mata telanjang, oleh karena itu disebut dengan retak makro. Pengamatan retak pada penelitian biasanya difokuskan pada tahap ini. Adapun model mekanisme crack secara plastis terdapat pada Gambar 2.16 dibawah ini.



Gambar 2.16 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan kecil (e) beban tekan maksimum (f) beban tarik kecil (Callister, 2007)

2.9 Patah Akhir (*Final Fracture*) dari Patah Lelah

Retak makro merambat sedikit demi sedikit dan bertambah panjang pada setiap siklus pembebanan yang selanjutnya menghasilkan keretakan yang semakin lama semakin panjang. Akhirnya penampang logam semakin kecil dan tidak lagi

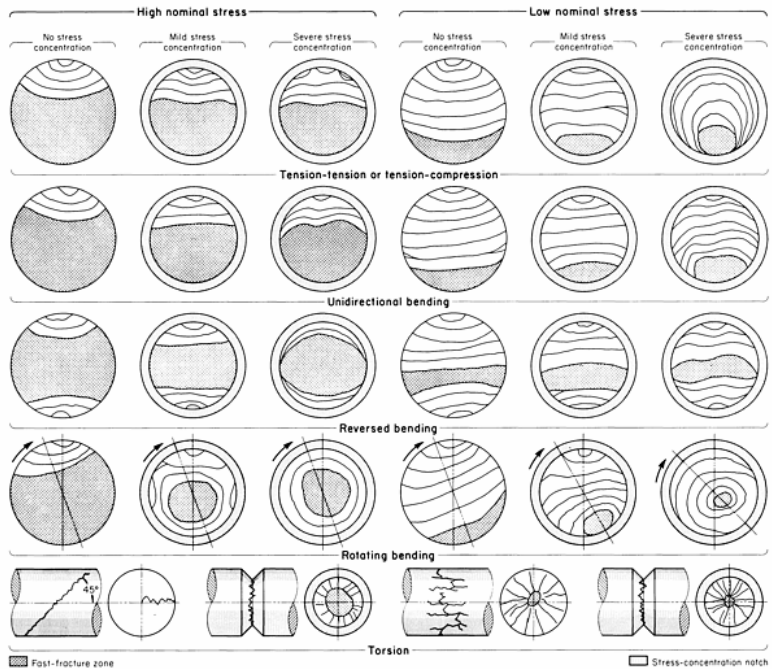


mampu mendukung beban yang diterima. Akhirnya logam akan patah. (ASM Metal Handbook Vol.19 *Fatigue and fracture*, 2002)

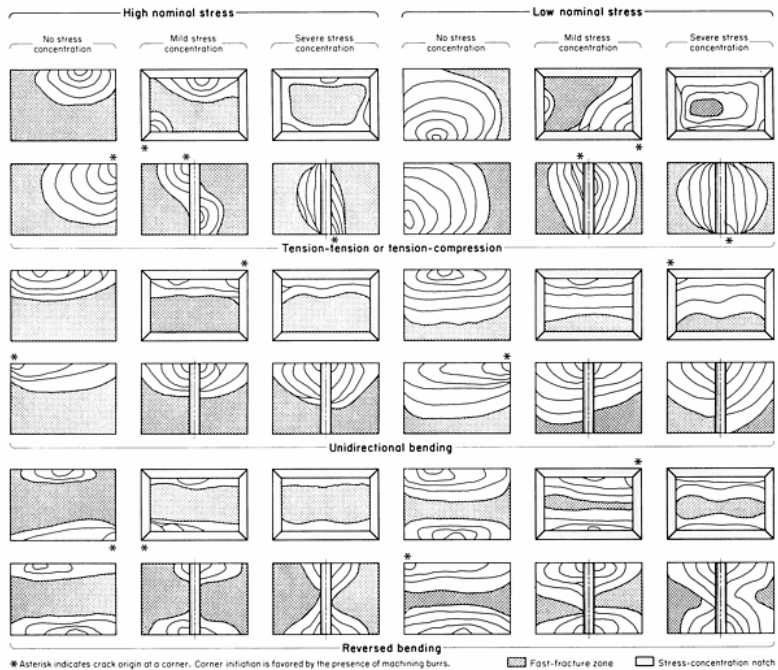
Karakteristik yang terlihat dari patah lelah (*fatigue fracture*) adalah *beach mark* atau *clam shell marking* pada patahan yang terkena beban siklik. Perlu disebutkan juga bahwa *marks* atau pola tersebut dapat muncul pada kondisi tertentu oleh mekanisme patah yang lainnya yang melibatkan pertumbuhan *cyclic crack* tanpa beban siklik. Dan juga pola patahan tersebut mungkin juga tidak terlihat pada semua material yang gagal akibat *fatigue*; contohnya, banyak dari *cast iron* tidak memunculkan *beach marks*.

Klasifikasi dasar dari proses patah bila ditinjau dari modulus dan penyebabnya adalah patah ulet, patah getas, patah lelah (*fatigue*), dan patah merangkak (*creep/monotonic*). Masing-masing dari jenis patahan diatas memiliki karakteristik tersendiri. Berikut adalah karakteristik dasar untuk membedakan jenis patah lelah dengan patah merangkak,; (ASM Metal Handbook Vol.12 *Fractography*, 2002)

1. *Beachmarks* dan striasi mengindikasikan patah lelah, sedangkan pada patah merangkak parameter tersebut tidak terlihat. Pertanda kehadiran *beach marks* bisa diketahui melalui pengamatan makro menggunakan *stereomicroscope*, dan striasi hanya bisa diamati pada saat dilaksanakan *fractography*
2. Profil *beach marks* dan striasi ini merupakan hasil dari fluktuasi pembebanan yang diberikan pada benda. Pada Gambar 2.17 dan 2.18 dijelaskan macam-macam jenis kegagalan *fatigue*



Gambar 2.17 Skema permukaan patah kegagalan *fatigue* dengan penampang lingkaran (ASM Metal Handbook Vol.12 *Fractography*, 2002)



Gambar 2.18 Skema permukaan patah kegagalan fatigue dengan penampang persegi (ASM Metal Handbook Vol.12 *Fractography*, 2002)

2.10 Persamaan *Beach Marks* dan *Striasi*

Persamaan striasi dan beach marks adalah sebagai berikut:

1. Keduanya menunjukkan posisi ujung retak yang terjadi setiap saat sebagai fungsi dari waktu siklik
2. Keduanya berasal dari lokasi awal retak yang sama
3. Keduanya memiliki arah retak yang sama (*parallel ridges*)
4. Keduanya tidak hadir dalam logam-logam yang terlalu lunak atau terlalu lunak. (Akan, 2007)



2.11 Perbedaan Beach Marks dan Striasi

Berikut merupakan perbedaan beach marks dan striasi

1. Ukuran striasi adalah mikroskopis ($1 \div 100 \mu$) dan hanya dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop elektron.
2. Ukuran *beach marks* adalah makroskopis ($> 1000 \mu$ atau 1 mm) dan dapat dilihat dengan mata telanjang
3. Striasi mewakili majunya ujung retakan yang bergerak setiap satu siklus pembebanan, sedangkan *beach marks* mewakili posisi dari ujung retakan ketika beban siklik berhenti untuk satu perioda tertentu. (*satu beach mark* dapat terdiri atas ratusan bahkan ribuan buah striasi). (Akuan, 2007)

2.12 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kelelahan Logam

Kelelahan logam diawali dengan pembentukan awal retak dan dilanjutkan dengan penjararan retakan hingga komponen mengalami patah. Lokasi awal retak pada komponen atau logam yang mengalami pembebanan dinamis atau siklik adalah pada titik daerah dimana memiliki kekuatan yang paling minimum dan atau pada titik daerah dimana mengalami tegangan yang paling maksimum. Oleh karena itu untuk memperkirakan umur lelah suatu komponen merupakan suatu hal yang cukup sulit, hal ini disebabkan oleh banyaknya faktor-faktor yang mempengaruhi umur lelahnya. Faktor-faktor tersebut adalah:

1. Pembebanan
 1. Jenis beban : uniaksial, lentur, punter
 2. Pola beban : periodik, random
 3. Besar beban (besar tegangan)
 4. Frekuensi siklus beban
2. Kondisi Material
 1. Ukuran butir
 2. Kekuatan
 3. Penguatan dengan larutan padat



4. Penguatan dengan fasa ke-2
 5. Penguatan regangan
 6. Struktur mikro
 7. Kondisi permukaan (*surface finish*)
 8. Ukuran komponen
3. Proses Pengerjaan
 1. Proses pengecoran
 2. Proses pembentukan
 3. Proses pengelasan
 4. Proses pemesinan
 5. Proses perlakuan panas
 4. Temperatur Operasi
 5. Kondisi Lingkungan (Akuan, 2007)

2.13 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah mikroskop yang menggunakan *electron* sebagai pengganti cahaya untuk melihat benda dengan resolusi yang tinggi dibandingkan dengan mikroskop optik. Analisa SEM digunakan untuk mengetahui mikrostruktur. Berkas sinar *electron* dihasilkan dari filamen yang dipanaskan yang disebut *electron gun*. Sebuah ruang vakum diperlukan untuk preparasi specimen. Cara kerja SEM adalah gelombang *electron* yang dipancarkan *electron gun* terkondensasi pada lensa kondensor dan terfokus sebagai titik yang jelas oleh lensa obyektif. *Scanning coil* yang diberi energi akan menghasilkan medan magnetik bagi sinar *electron*. Berkas sinar *electron* yang mengenai specimen menghasilkan *electron* sekunder dan kemudian dikumpulkan oleh detektor sekunder atau detektor *backscatter*. Pada permukaan *Cathode Ray Tube (CRT)* akan menghasilkan gambar yang terdiri dari ribuan titik dalam berbagai intensitas sebagai topografi gambar. Pada layar akan diproyeksikan berkas *electron* yang sebelumnya dikonsentrasikan pada specimen yang bayangannya diperbesar dengan lensa obyektif. (Kroschwits, 1990)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



2.14 Uji Kekerasan Vickers

Uji kekerasan Vickers menggunakan indentor piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besar sudut antar permukaan – permukaan piramida yang saling berhadapan adalah 136°.

Angka kekerasan Vickers didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan indentasi. Pada prakteknya luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak. Angka kekerasan VHN ditentukan menurut ASTM E97-82R03 melalui persamaan :

$$\text{VHN} = \frac{2F \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2}$$

Dimana :

F : Beban yang digunakan (kgf)

D : Panjang diagonal indentasi (mm)

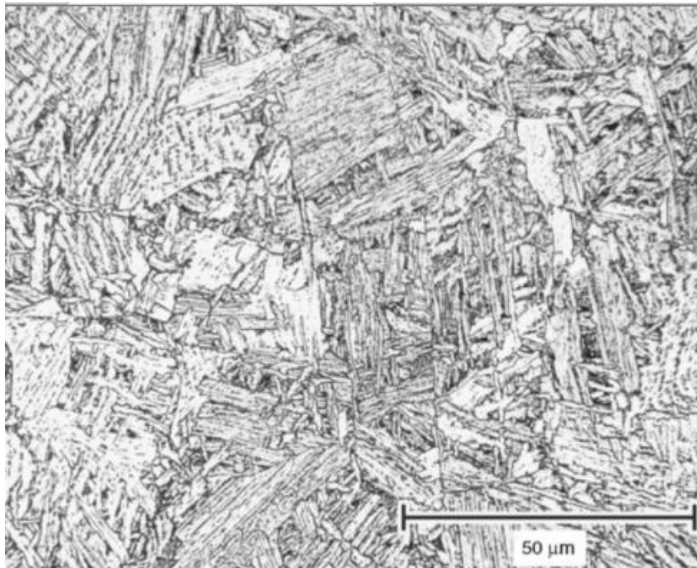
Θ : Sudut penetrator (136°) (Dieter, 1987)

2.15 Bainit

Bainit adalah struktur ferit dan sementit yang berbentuk lidi atau plat tergantung temperatur transformasi. Struktur mikro bainit adalah sangat halus sehingga resolusinya hanya bisa dilihat dengan mikroskop elektron . Foto mikroskop untuk bainit bisa dilihat pada Gambar 2.19. Temperatur pembentukan bainit terjadi dibawah temperatur pembentukan pearlite yaitu diantara temperatur 215 °C-540 °C. Laju pembentukan bainit akan naik dengan naiknya temperatur. Bainit dibagi menjadi dua, *upper bainite* dengan bentuk *feathery* (menyerupai bulu) dan *lower bainite* dengan bentuk *accicular* (menyerupai jarum). *Upper bainite* terbentuk pada temperatur transformasi yang cenderung tinggi (550-400°C), sementara *lower bainite* terbentuk pada temperatur yang lebih rendah (400-250°C), saat pendinginan berlangsung secara isothermal. Kekerasan pada bainit akan



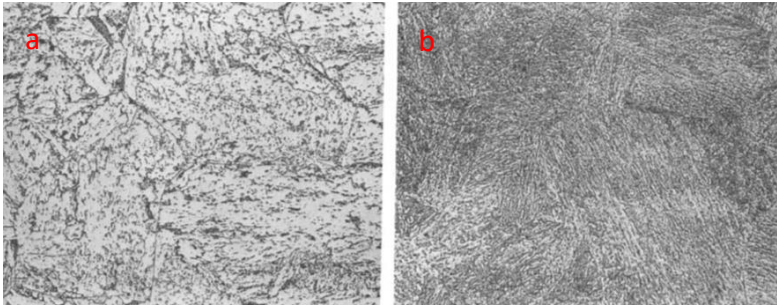
meningkat seiring dengan turunnya temperatur transformasinya (ASM Metal Handbook Vol. 9 Metallography, 2002)



Gambar 2.19 Struktur mikro bainit dari baja paduan rendah yang telah mengalami perlakuan panas (ASM Metal Handbook Vol. 9 Metallography, 2002)

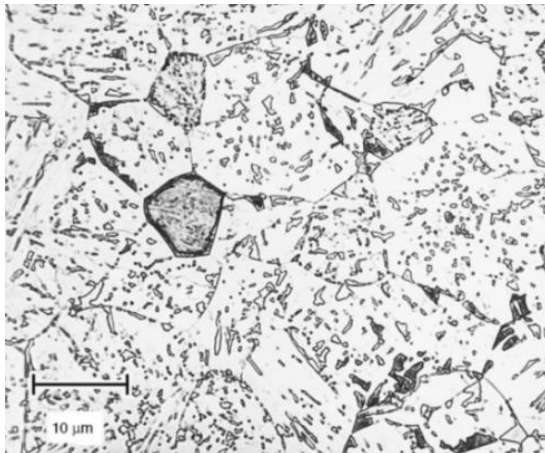
Namun pada proses manufaktur, umumnya baja mengalami pendinginan secara kontinyu, bukan isothermal. Sehingga istilah *upper bainite* dan *lower bainite* tidak lagi relevan dalam proses pendinginan kontinyu. Bainit kemudian diidentifikasi berdasarkan morfologinya, dan dibedakan menjadi bainit *Class 1* (B₁), *Class 2* (B₂), dan *Class 3* (B₃). B₁ mempunyai morfologi matrix ferrit yang berbentuk bilah (*accicular*) disertai dengan sementit yang berada di dalam bilah ferrit. B₂ terdiri dari matrix bilah ferrit disertai dengan sementit yang berada di batas butir antar bilah ferrit (*grain boundary*). Pada Gambar 2.20 ditunjukkan (a) B₁ dapat mewakili istilah *upper bainite*, sementara (b) B₂ mewakili *lower bainite* (Bramfitt, 1998).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2.20 Perbedaan *upper* bainit (B₁) (kiri), dan *lower* bainit (B₂) (kanan) (Bramfitt, 1998)

B₃ terdiri atas matriks ferrit dengan partikel-partikel yang terdiri dari martensit ataupun austenit sisa. B₃ biasa dikenal dengan istilah *granular bainit* ditunjukkan pada Gambar 2.21 (Bramfitt, 1998).

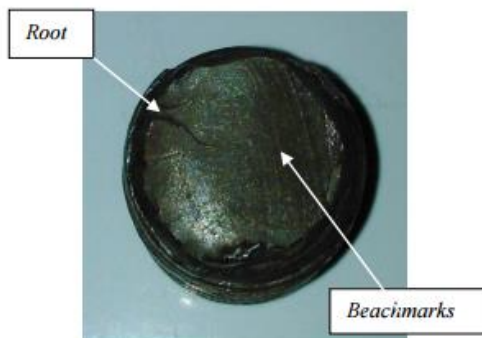


Gambar 2.21 Struktur mikro granular bainit (ASM Metal Handbook Vol. 9 Metallography, 2002)

2.15 Penelitian Sebelumnya

2.15.1 Analisis Kegagalan Baut Pengikat Gearbox pada Lokomotif Kereta Rel Diesel Elektrik (Krd)

Fatigue atau lelah adalah bentuk dari kegagalan yang terjadi pada struktur yang disebabkan karena beban dinamik yang berfluktuasi dibawah kekuatan luluhnya yang terjadi dalam waktu yang lama dan berulang-ulang. Retak fatigue biasanya bermula dari permukaan yang merupakan tempat beban berkonsentrasi. Fatigue menyerupai patah getas yaitu ditandai dengan deformasi plastis yang sangat sedikit. Proses terjadinya fatigue ditandai dengan retak awal, perambatan retak dan patah akhir. Beachmarks adalah fitur unik yang ditemukan dibanyak kasus kelelahan dan kehadiran mereka merupakan sarana positif untuk mengidentifikasi fraktur kelelahan. Beachmarks dapat dilihat pada Gambar 2.22.

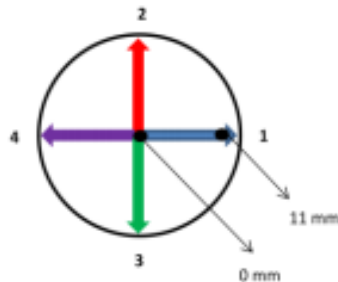


Gambar 2.22 Axel baja karbon-sedang dengan fraktur kelelahan di sebagian besar penampang sebelum pecah akhir (Aji, 2014)

Pengujian kekerasan menggunakan mesin Rockwel Hardness Tester type HR-150A dengan metode Rockwell skala C dengan penetrator yang digunakan intan kerucut dengan beban mayor 150kg. Uji kekerasan dilakukan pada spesimen pada posisi tertentu



yang dapat dilihat pada Gambar 2.23 dan hasil uji kekerasan dapat dilihat pada Tabel 2.6.

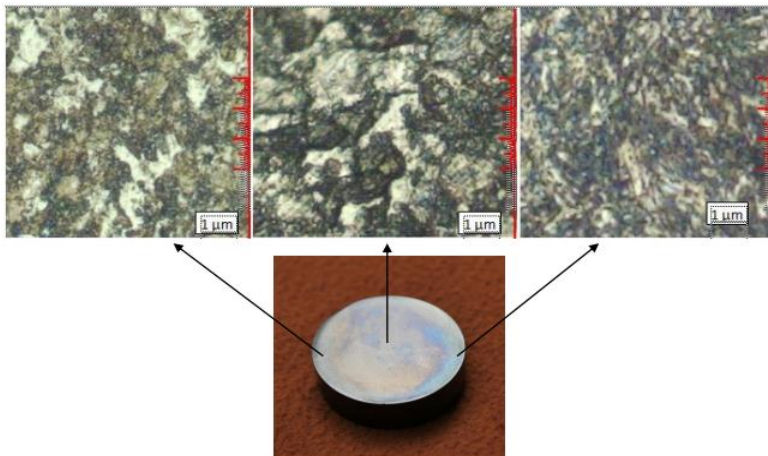


Gambar 2.23 Pembagian posisi pengujian kekerasan (Aji, 2014)

Tabel 2.4 Hasil pengujian kekerasan

Jarak dari pusat diameter baut	nilai kekerasan					SAE J429
	posisi 1	posisi 2	posisi 3	posisi 4	rata-rata	
0 mm	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	Bagian dalam 25-34 HRC
3 mm	25	24	25.5	24	24.63	
6 mm	25.5	28	31	27	27.88	
9 mm	28	29	27.5	28	28.13	Bagian luar max 54 HRC
11 mm	29.5	30	26	30	28.88	

Untuk memperkuat data hasil pengujian kekerasan. Maka dilakukan pengujian metalografi yang bertujuan untuk melihat struktur mikro dari material baut. Pengujian dilakukan di Laboratorium Material Teknik Undip. Pengujian dilakukan menggunakan mikroskop optic dengan perbesaran 200x. Gambar hasil mikrografi dapat dilihat pada Gambar 2.24 berikut. Pengujian strukturmikro menggunakan Nital etching.



Gambar 2.24 Struktur mikro baut dengan perbesaran 200x (Aji, 2014)

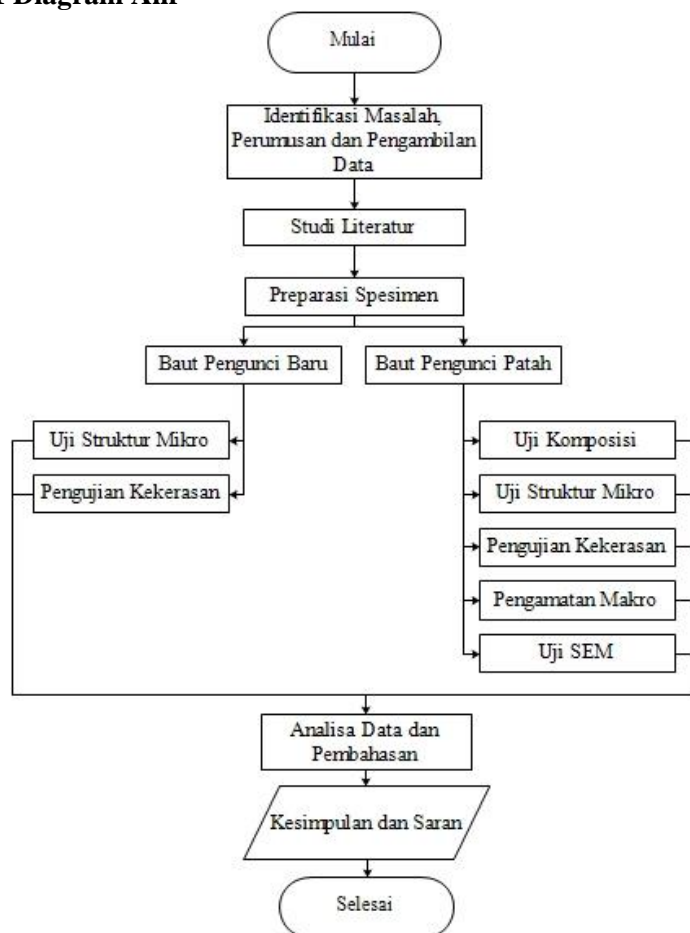
Dari Gambar 2.24. menunjukkan proses quench and temper yang gagal sehingga fasa yang dihasilkan bukan martensit melainkan ferrite dan pearlite. Hal ini dibuktikan dari foto struktur mikro hasil pengujian laboratorium (Gambar 2.24.) berbeda dengan foto struktur mikro dari jurnal yang berfasa martensit. Serta uji kekerasan yang tidak sesuai dengan spesifikasi SAE J429 grade 5. (Aji, 2014)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



3.2 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, pengujian dan studi literatur. Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi lapangan

Metode ini mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponennya dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu *Section of Finish Mill 3-4 Machine Maintenance* PT. Semen Indonesia, dan berdiskusi dengan dosen mata kuliah, dosen pembimbing, dan pihak PT. Semen Indonesia yang ahli dibidangnya.

2. Studi Literatur

Metode studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal penelitian, dan situs industri yang mempelajari tentang permasalahan analisa kegagalan pada baut pengunci pelat *trunnion*.

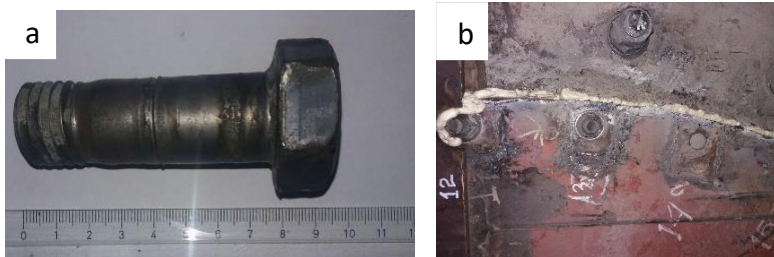
3. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam penelitian ini yaitu : pengamatan makro bentuk *crack* dengan mikroskop optik dan kamera digital, pengamatan mikro dengan SEM, uji komposisi dengan menggunakan *Optical Emission Spectroscopy (OES)* dan uji kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan pada material baut pengunci pelat *trunnion*.

3.3 Material yang digunakan

3.3.1 Material

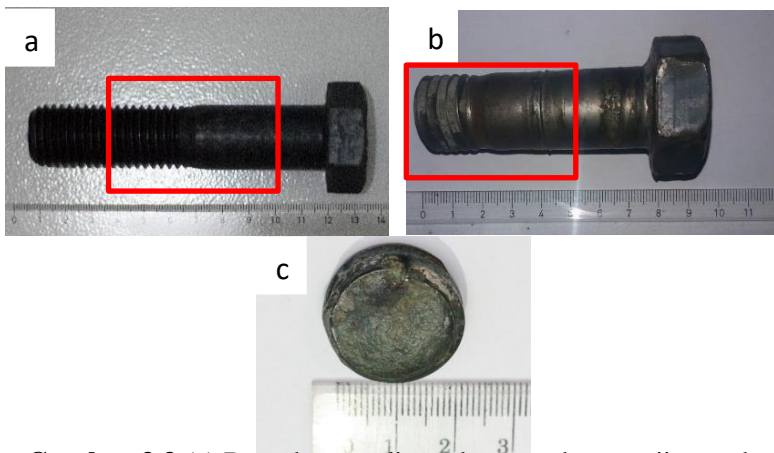
Pada tanggal 9 Januari 2017 ditemukan baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill* di *finish mill* Pabrik Tuban III patah menjadi 2 bagian yang diperlihatkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 (a) Bagian *baut* pengunci yang patah (b) baut pengunci yang masih terpasang

3.3.2 Spesimen

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu potongan dari permukaan baut yang patah, potongan melintang dan membujur dari baut yang baru dan baut yang gagal untuk pengujian kekerasan dari daerah yang jauh hingga daerah yang dekat dengan patahan, dapat dilihat pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 (a) Daerah yang digunakan untuk pengujian pada baut baru (b) daerah yang digunakan untuk pengujian pada baut patah (c) potongan permukaan baut pengunci patah



3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Penggaris
Digunakan untuk mengukur spesimen.
2. Alat Pemotong
Digunakan untuk memotong spesimen.
3. Kamera Digital
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara makro.
4. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)
Digunakan untuk mengetahui komposisi material uji
5. Hardness Test
Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji.
6. Amplas grade 80 hingga 2000
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
7. Mesin Polish
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
8. Larutan Etsa
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi.
9. Mesin SEM –EDX
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara topografi permukaan.

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data data perusahaan yang berkaitan dengan baut pengunci pelat *trunnion* sebagai pendukung hasil penelitian, berikut data yang harus diambil, yaitu:

1. Desain baut pengunci *trunnion*
2. Data Operasi
3. Spesifikasi Material

3.5.2 Uji Komposisi

Pengujian komposisi adalah untuk mengetahui komposisi paduan dan jumlahnya yang terdapat pada komponen yang mengalami kegagalan. Pada identifikasi komposisi menggunakan alat *Optical Emission Spectroscopy (OES) Spectralanlyse FOUNDRY-MASTER PRO* ditunjukkan pada Gambar 3.4 di Laboratorium Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) untuk mengetahui komposisi yang ada pada baut pengunci *trunnion*. pengujian dilakukan pada potongan material yang patah dan mengalami preparasi spesimen terlebih dahulu.



Gambar 3.4 Mesin *OES FOUNDRY-MASTER PRO*

3.5.3 Pengamatan Makroskopik

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro. Pengamatan makro dilakukan menggunakan kamera digital merk Sony Cyber-shot RX100 dan *stereomicroscope Carl Zeiss Stemi DV4*.

Adapun perlakuan terhadap sampel material sebagai berikut:

1. Melakukan pengambilan fotografi dengan kamera digital untuk mendapatkan informasi bentuk dari kegagalan secara makro, ditunjukkan pada Gambar 3.5 (a).

BAB III METODOLOGI



2. Pengamatan melalui *stereomicroscope* terhadap sampel material dengan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan profil makronya, ditunjukkan pada Gambar 3.5 (b).



Gambar 3.5 (a) Kamera digital merk Sony Cyber-shot RX100
(b) *stereomicroscope* Carl Zeiss Stemi DV4

3.5.4 Pengamatan SEM (Scanning Electron Microscopic)

SEM (*Scanning Electron Microscope*) adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk menganalisa permukaan dari objek solid secara langsung dan detail pada perbesaran yang lebih tinggi. Serta melakukan pengamatan fraktografi yang dilakukan untuk mengetahui profil permukaan patahan dan perambatan retak secara mikro dengan menggunakan Mesin SEM –EDAX FEI type Inspect S-50.

3.5.5 Uji Metallografi

Pengujian metallografi dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro pada daerah baut pengunci *trunnion* yang dekat dengan bagian yang patah dibandingkan dengan baut pengunci yang baru. Pengamatan metallografi ini menggunakan mikroskop optik, untuk pengujian ini baut dipotong secara melintang. Mikroskop yang digunakan adalah mikroskop optik *Olympus BX51M-RF*, ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Mikroskop optik *Olympus BX51M-RF*

3.5.6 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan menggunakan metode Vickers yang memakai indenter piramida intan yang bagian dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besar sudut antar permukaan piramida intan yang saling berhadapan adalah 136° . Pengujian ini dilakukan dengan indentasi dari titik bagian yang patah hingga bagian yang jauh dengan patahan dan juga pada baut pengunci *trunnion* yang baru pada posisi yang sama dengan 5 titik indentasi, pembebanan sebesar 100 kgf dengan waktu indentasi 10 detik. Mesin yang digunakan adalah *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A*. Ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A*

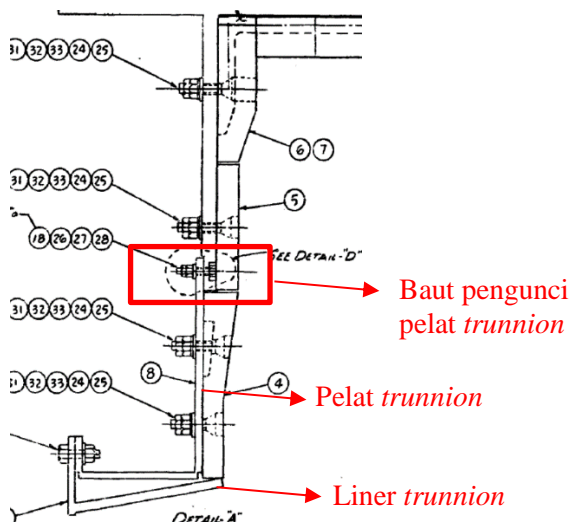
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Record Baut Pengunci Pelat *Trunnion* pada Ball Mill

Pada bulan Januari 2017 PT. Semen Indonesia sedang melaksanakan maintenance rutin yang berlangsung selama 1 minggu. Kemudian pada *Ball Mill* Tuban III ditemukan komponen patahan baut pengunci pelat *trunnion*. Menurut operator, umur komponen ini masih diluar lifetime dan masih tersisa 4 tahun 11 bulan lagi. Sebelumnya baut pengunci pelat *trunnion* ini sudah patah dengan waktu sekitar 30 hari setelah pemasangan baut yang baru. Baut pengunci pelat *trunnion* ini menggunakan material baja karbon rendah.

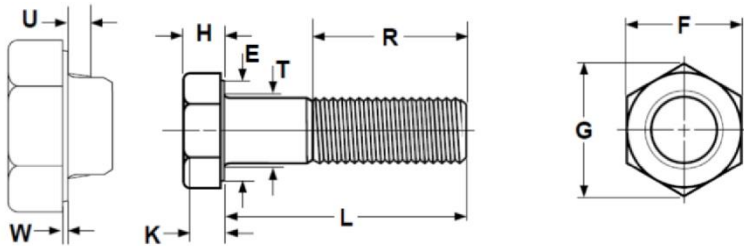
Baut pengunci pelat *trunnion* menghubungkan pelat *trunnion* dengan kepala *ball mill*. Komponen pelat *trunnion* terdiri dari pelat *trunnion ball mill* dan liner *trunnion* ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Letak baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill*



Berikut ini data-data dari baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill*. Pada gambar 4.2 ditunjukkan desain baut pengunci pelat *trunnion*, pada tabel 4.1 ditunjukkan dimensi dari baut pengunci dan pada tabel 4.2 ditunjukkan data operasi *ball mill* pada *finish mill* 3 PT. Semen Indonesia



Gambar 4.2 Desain baut pengunci pelat *trunnion* pada PT. Semen Indonesia

Tabel 4.1 Dimensi Baut Pengunci Pelat *Trunnion* PT. Semen Indonesia

Diameter kepala baut	36 mm
Panjang kepala baut	15 mm
Panjang leher total	110 mm
Panjang ulir baut	60 mm
Diameter leher baut	23,84

Tabel 4.2 Data Operasi Ball Mill pada Finish Mill 3 PT. Semen Indonesia

Kapasitas rata-rata	215 ton/jam
Temperatur Operasi	130 ⁰ C
Kecepatan putaran mesin	14,5 Rpm

4.1.2 Hasil Uji Komposisi

Pengujian komposisi dilakukan pada baut pengunci pelat *trunnion* dengan komposisi yang terlihat pada tabel 4.3



Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Uji Komposisi Kimia Baut
Pengunci dengan ISO 898-1 grade 10.9

Unsur	Baut Pengunci	ISO 898-1 grade 10.9
C	0,221	0,20 - 0,55
P (max)	0,0180	0,025
S (max)	0,0069	0,025
B (max)	0,0007	0,03
Mn (min)	0,742	0,7
Si	0,230	-
Cr	0,929	-
Mo	0,0079	-
Ni	0,0180	-
Fe	Balance	Balance

Dari hasil uji komposisi pada Tabel 4.3 dapat terlihat bahwa baut terbuat dari bahan/ material baja paduan dengan klasifikasi sesuai dengan ISO 898-1 grade 10.9. Dimana penggunaan baut pengunci pada grade 10.9 berbeda dengan spesifikasi alat yang seharusnya menggunakan baut dengan grade 8.8.



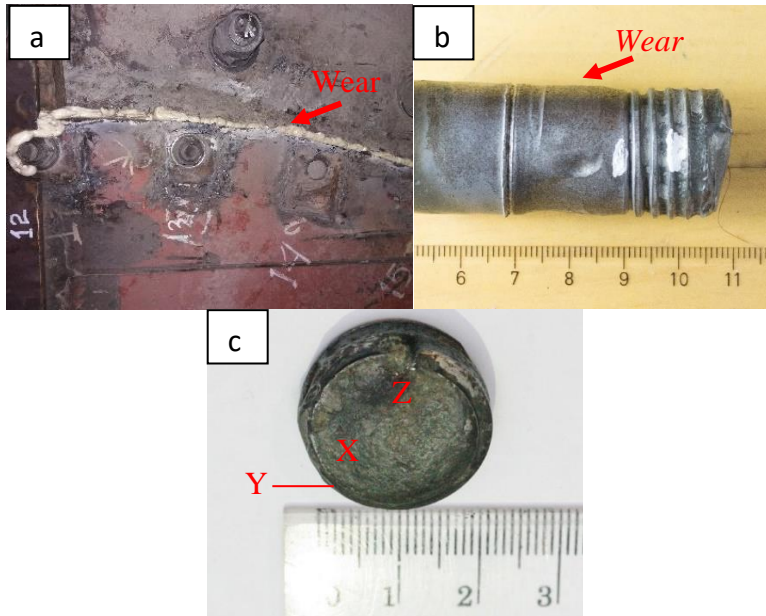
Tabel 4.4 Perbandingan Hasil Uji Komposisi Kimia Baut
 Pengunci dengan ISO 898-1 grade 8.8

Unsur	Baut Pengunci	ISO 898-1 grade 8.8
C	0,221	0,25 - 0,55
P (max)	0,0180	0,025
S (max)	0,0069	0,025
B (max)	0,0007	0,03
Mn (min)	0,742	-
Si	0,230	-
Cr	0,929	-
Mo	0,0079	-
Ni	0,0180	-
Fe	Balance	Balance

Dari perbandingan hasil uji komposisi pada Tabel 4.4 dapat terlihat jika dibandingkan dengan komposisi kimia ISO 898-1 grade 8.8 bahwa baut pengunci yang patah memiliki kadar karbon yang lebih rendah dari standar grade 8.8 tetapi memiliki kandungan mangan (Mn) yang lebih tinggi.

4.1.3 Hasil Pengamatan Makroskopik

Berdasarkan hasil pengamatan visual secara makro dengan menggunakan kamera *digital* pada saat baut pengunci yang gagal ditemukan terlihat pada Gambar 4.3 (a) ditemukan celah pada pelat *trunnion* yang menandakan pelat mengalami deformasi.



Gambar 4.3 Pengamatan visual baut pengunci pelat *trunnion*
(a) pengamatan baut gagal yang terpasang pada pelat *trunnion* (b) pengamatan *wear* pada baut pengunci (c) pengamatan permukaan patahan baut pengunci

Berdasarkan hasil dari pengamatan visual secara makro dengan menggunakan kamera *digital* pada baut pengunci ditemukan deformasi plastis berupa *wear* ditunjukkan pada Gambar 4.3 (b) . Pada pengamatan permukaan patahan baut pengunci pelat *trunnion* yang terlihat pada Gambar 4.3 (c). Terlihat kegagalan baut pengunci pelat *trunnion* bermula dari bagian bawah sebelah kiri



dan menjalar sampai kebagian atas. Lalu kemudian pada gambar 4.3 (c) permukaan patahan dibagi menjadi 3 daerah yaitu retak awal (*initial crack*) pada daerah Y, penjararan retak (*crack propagation*) pada daerah X, dan retak akhir (*final crack*) pada daerah Z.

4.1.4 Hasil Pengamatan Mikroskop Stereo

Berdasarkan pengamatan baut pengunci pelat *trunnion* pada daerah yang patah menggunakan mikroskop stereo dengan perbesaran 8x yang memiliki perbesaran lebih besar daripada kamera *digital*.

Pengamatan pada Gambar 4.4 yaitu pada penampang patahan ditunjukkan adanya awal retak (*crack initiation*) ditunjukkan tanda panah, pada *initial crack* ini memiliki permukaan yang lebih terang. Kemudian dari *initial crack* yang kemudian arah retakannya menjalar (*crack propagation*)



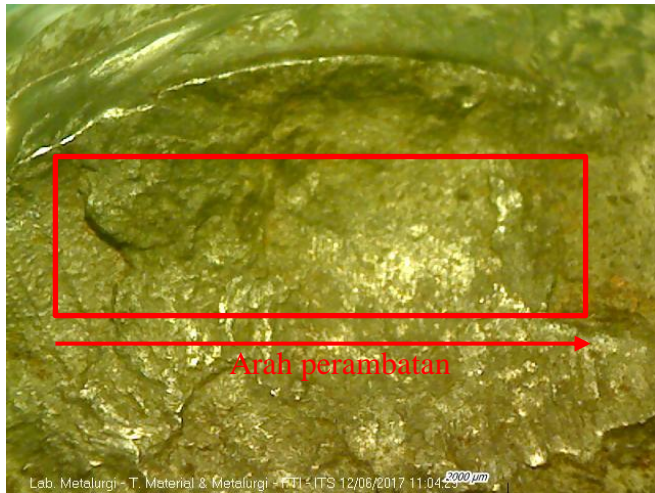
Gambar 4.4 Pengamatan *crack initiation* dengan mikroskop stereo perbesaran 8 kali



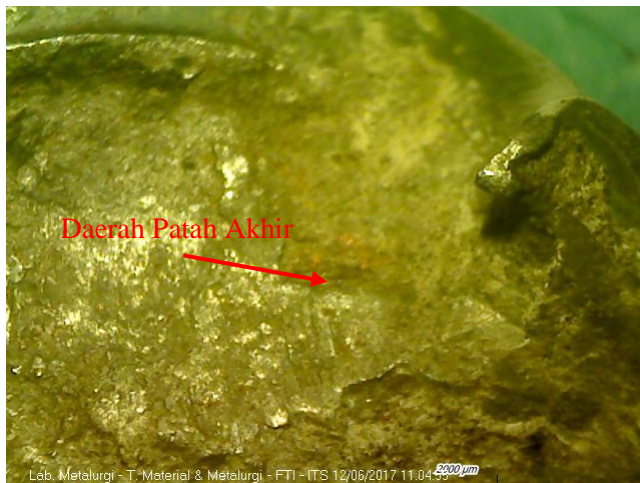
Kemudian dari *initial crack* patahan berlanjut pada daerah penjarangan retak (*crack propagation*) ditunjukkan pada Gambar 4.5. Dimana pada daerah ini terjadi *fatigue zone* dimana terjadi pertumbuhan retak yang lambat. Pada daerah ini juga terlihat *beach mark* ditunjukkan pada tanda panah yang merupakan indikasi dari patah lelah. Daerah ini memiliki permukaan yang lebih halus daripada daerah *rupture zone* atau daerah patah cepat.



Gambar 4.5 Pengamatan *crack propagation* dengan mikroskop stereo perbesaran 8 kali



Gambar 4.6 Pengamatan *crack propagation* menjalar ke arah *final fracture* dengan mikroskop stereo perbesaran 8 kali



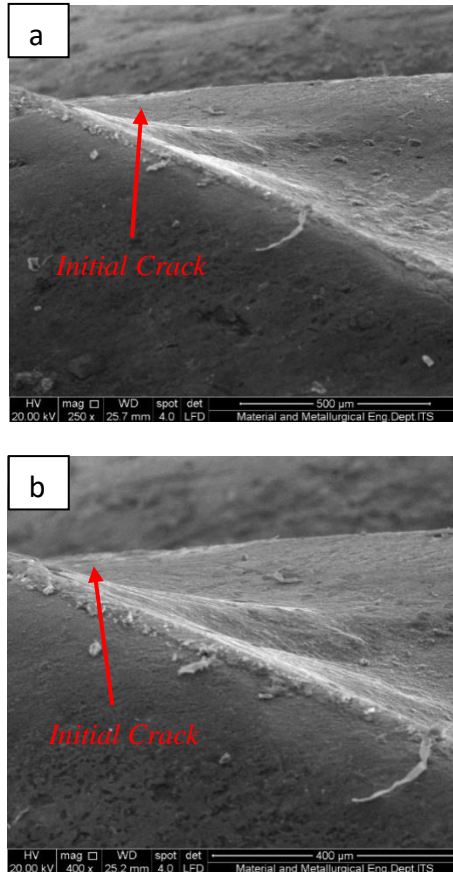
Gambar 4.7 Pengamatan patah akhir (*final fracture*) dengan mikroskop stereo perbesaran 8 kali



Kemudian setelah dari *propagation crack* kemudian menjalar hingga ke bagian patah akhir (*final crack*) ditunjukan dengan panah pada gambar 4.6 . Pada daerah *final fracture* yang ditunjukan gambar 4.7 menunjukan kontur permukaan dari patah akhir yang memiliki permukaan yang kasar, hal ini disebabkan karena patah akhir (*final crack*) mendapatkan perambatan patah secara cepat (*rapid failure*). Ditunjukan juga adanya perubahan tinggi pada penampang komponen pada daerah patah akhir. Meninjau hasil pengamatan makro dengan mikroskop stereo tampak patahan yang terjadi pada baut pengunci pelat *trunnion* dapat dikategorikan sebagai patah lelah.

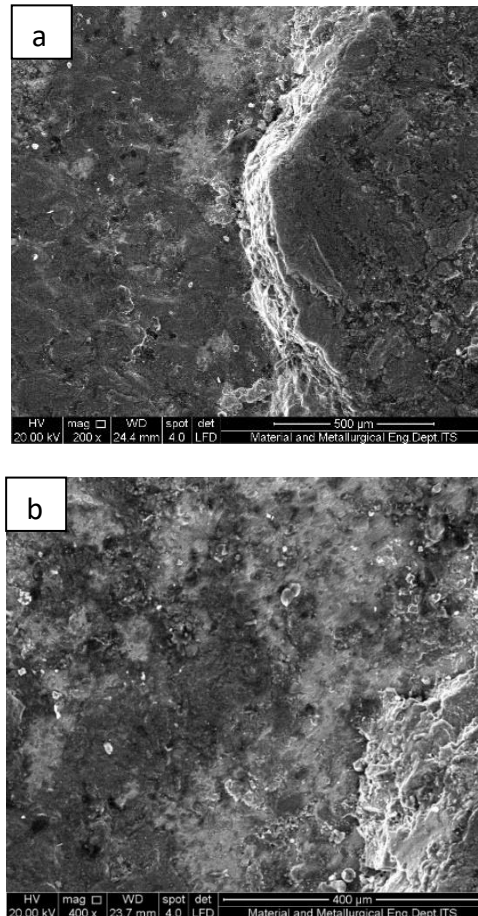
4.1.5 Hasil Pengamatan SEM (Scanning Electron Microscope)

Pengamatan SEM dilakukan untuk menganalisa profil permukaan dan fraktografi dari permukaan patahan baut pengunci. Pada Gambar 4.8 menunjukan daerah *initial crack* pada permukaan patahan dengan perbesaran 250x dan 400x. Pada daerah *initial crack* ditandai dengan daerah permukaan yang lebih rendah dibandingkan permukaan lain, dan mempunyai persebaran butir – butir halus. Daerah *initial crack* ini terjadi pada permukaan baut pengunci yang merupakan daerah yang pertama dalam menerima beban.



Gambar 4.8 (a) Pengamatan SEM pada *crack initiation* 250x ;
(b) pengamatan SEM pada *crack initiation* perbesaran 400x

Kemudian pengamatan SEM dilanjutkan ke daerah perambatan retakan dengan dengan perbesaran 200x dan 400x, ditunjukan pada gambar 4.9 terlihat perbedaan ketinggian secara nyata dan warna yang lebih gelap daripada daerah *crack initiation*. Memiliki profil permukaan yang lebih kasar daripada *initial crack*.

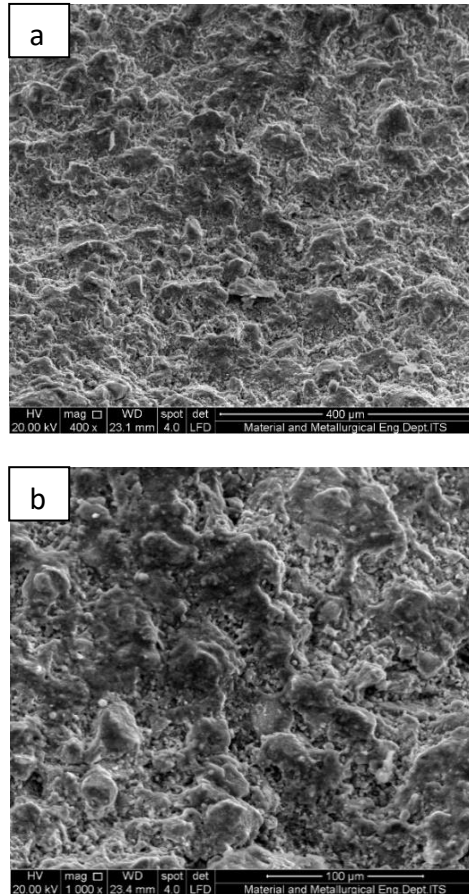


Gambar 4.9 (a) Pengamatan SEM pada *crack propagation* 250x ;
(b) pengamatan SEM pada *crack propagation* perbesaran 400x

Pada Gambar 4.10 ditunjukkan daerah patah akhir (*final crack*) pada permukaan patahan baut pengunci. Pada daerah *initial crack* memiliki profil permukaan yang kasar dengan butiran – butiran yang kasar (*coarse grain*). Ini diakibatkan dikarenakan



mengalami perambatan *crack* secara cepat akibat komponen tidak bisa menerima beban dengan luasan yang tersisa.



Gambar 4.10 (a) Pengamatan SEM pada *final crack* perbesaran 400x ; (b) pengamatan SEM pada *final crack* perbesaran 1000x

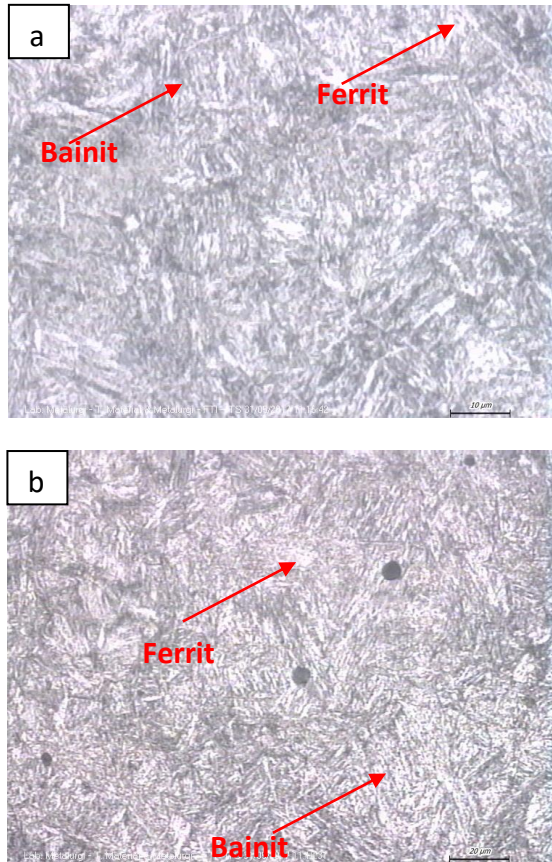
4.1.6 Hasil Metalografi

Pengamatan struktur mikro untuk memperoleh informasi yang lebih mendalam tentang struktur mikro yang ada pada

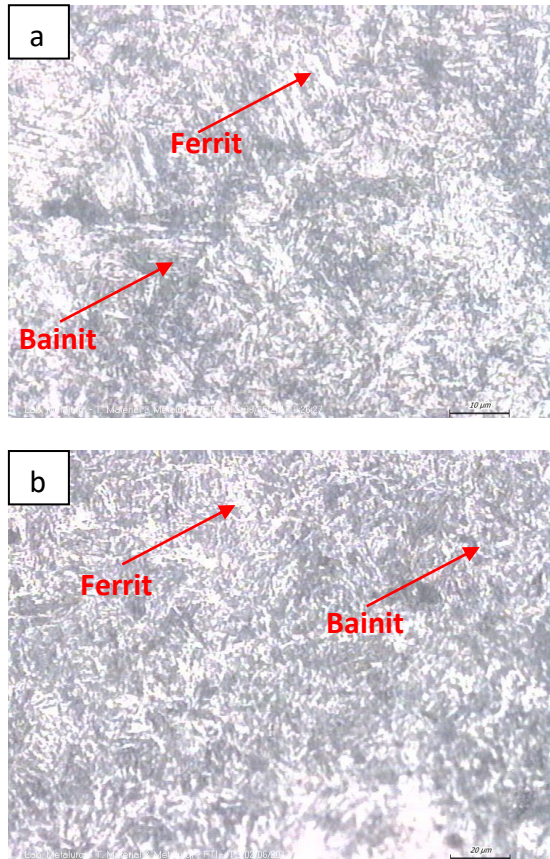


material yang patah maupun pada material yang baru. Pengamatan dilakukan dengan perbesaran 500x hingga 1000x dengan menggunakan mikroskop optik.

Gambar 4.11 menunjukkan foto struktur mikro dari baut pengunci yang baru dengan perbesaran 1000x dan 500x dan Gambar 4.12 menunjukkan foto struktur mikro dari baut pengunci yang gagal dengan perbesaran 1000x dan 500x dan menunjukkan perbedaan morfologi butir dari kedua material tersebut. Berdasarkan hasil foto struktur mikro tersebut, didapatkan bahwa bagian terang adalah fasa ferrit dan bagian gelap adalah fasa bainit. Gambar 4.12 menunjukkan bahwa bainit pada bagian yang patah mengalami *elongation* sehingga bentuknya memanjang dibandingkan dengan bainit pada struktur mikro baut pengunci yang baru yang ditunjukkan pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Struktur mikro baut pengunci baru ISO 898-1 grade 10.9; (a) perbesaran 1000x (b) Perbesaran 500x



Gambar 4.12 Struktur mikro baut pengunci gagal ISO 898-1 grade 10.9; (a) perbesaran 1000x (b) Perbesaran 500x

Bainit dan ferrit tersebut terbentuk pada material yang didapat dari perlakuan panas *quench* dan *tempered*.

4.1.7 Hasil Uji Kekerasan

Nilai kekerasan pada baut pengunci pelat *trunnion* ditentukan melalui pengujian kekerasan *Hardness Vickers* sesuai standart ASTM E92-82 RO3 dengan pembebanan 100 Kgf.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Pengujian kekerasan dilakukan pada potongan melintang dari baut pengunci pelat *trunnion* dengan lima titik indentasi yang ditunjukkan pada gambar 4.13, dan pada potongan membujur pada daerah yang jauh dari patahan hingga daerah yang dekat dengan patahan dengan sepuluh titik indentasi yang ditunjukkan pada gambar 4.15.



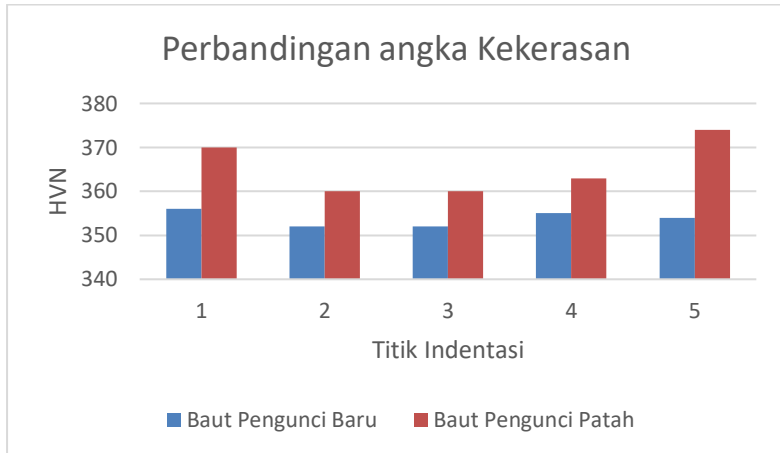
Gambar 4.13 Skema indentasi pembebanan kekerasan pada potongan melintang

Tabel 4.5 Hasil Uji Kekerasan Vickers pada Potongan Melintang dengan Pembebanan 100 Kgf

Titik indentasi	Nilai Kekerasan (HV)	
	Baut Pengunci Pelat <i>Trunnion</i> Baru	Baut Pengunci Pelat <i>Trunnion</i> Patah
1	356	370
2	352	360
3	352	360

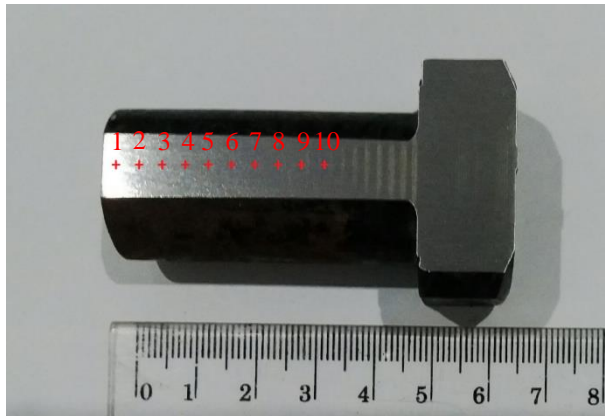


4	355	363
5	354	371
Average	353.8	364.8



Gambar 4.14 Perbandingan angka kekerasan baut pengunci pelat *trunnion* pada potongan melintang

Dari tabel 4.5 ditunjukkan nilai rata kekerasan baut pengunci pada potongan melintang, pada baut yang baru sebesar 353,8 HV, sedangkan pada baut yang patah sebesar 361.4 HV. Pada Gambar 4.14 menunjukkan grafik kekerasan dari material baut pengunci yang baru dan yang patah pada potongan melintang.



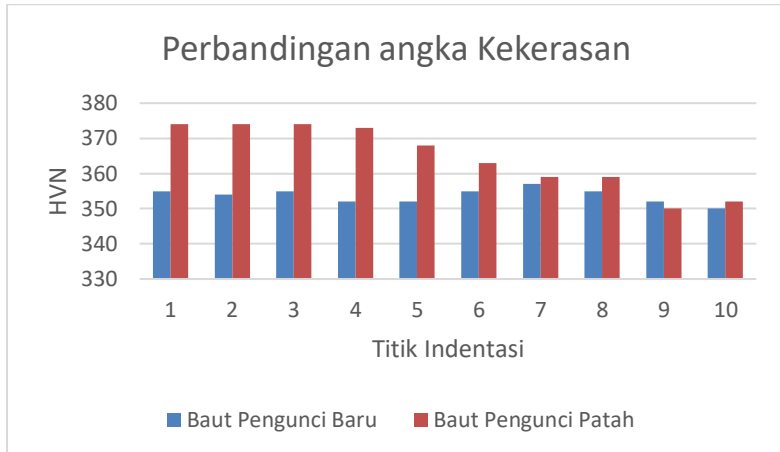
Gambar 4.15 Skema indentasi pembebanan kekerasan pada potongan membujur dari daerah yang dekat dari patah hingga daerah yang jauh dengan patahan

Tabel 4.6 Hasil Uji Kekerasan Vickers pada Potongan Membujur dengan Pembebanan 100 kgf

Titik Indentasi	Nilai Kekerasan (HV)	
	Baut Pengunci Pelat <i>Trunnion</i> Baru	Baut Pengunci Pelat <i>Trunnion</i> Patah
1	355	374
2	354	374
3	355	374
4	352	373
5	352	368
6	355	363
7	357	359
8	355	359



9	352	350
10	350	352
Average	353.7	364.4



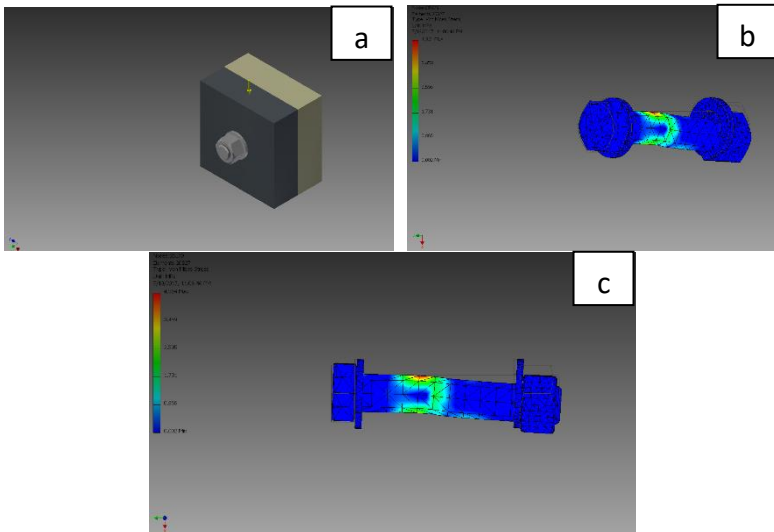
Gambar 4.16 Perbandingan angka kekerasan baut pengunci pelat *trunnion* pada potongan membujur

Pada tabel 4.6 diperlihatkan perbandingan kenaikan kekerasan dari daerah yang jauh dari patahan dan daerah yang dekat dari patahan dari baut pengunci yang patah dan baut yang baru pada potongan membujur. Pada baut yang patah didapatkan rata-rata kekerasan 366.4 dan pada baut yang baru didapatkan rata-rata kekerasan sebesar 353.7, pada Gambar 4.16 ditunjukkan grafik nilai kekerasan dari titik jauh dengan patahan hingga yang dekat dari patahan menunjukkan kenaikan kekerasan yang lebih tinggi pada baut yang patah jika dibandingkan dengan kenaikan kekerasan baut yang baru pada titik indentasi yang sama.



4.1.8 Analisa Titik Kritis

Software Autodesk Inventor digunakan untuk melakukan permodelan pada baut pengunci pelat *trunnion* untuk mengetahui tegangan yang paling tinggi pada komponen tersebut. Analisa tegangan dilakukan dengan batasan *fixed support* dan gaya yang diberikan diasumsikan sebesar 1809,79 N. Gaya diberikan dari arah atas menuju ke bawah.



Gambar 4.17 (a) Skema pembebanan (b) hasil simulasi pembebanan pada baut pengunci (c) hasil simulasi baut pengunci pandangan membujur

Gambar 4.17 menunjukkan pemodelan baut pengunci pelat *trunnion* menggunakan software inventor, pada Gambar 4.17 (a) ditunjukkan skema pembebanan dan pada Gambar 4.17 (b) ditunjukkan hasil simulasi pembebanan pada baut pengunci dan Gambar 4.17 (c) ditunjukkan hasil simulasi pandangan membujur menunjukkan pemusatan tegangan pada daerah yang berwarna merah.



4.2 Pembahasan

Berdasarkan dari hasil uji komposisi dapat terlihat bahwa baut pengunci pelat *trunnion* terbuat dari bahan/ material baja paduan dengan klasifikasi sesuai dengan ISO 898-1 grade 10.9. Dimana penggunaan baut pengunci pada grade 10.9 berbeda dengan spesifikasi alat *ball mill* yang seharusnya menggunakan baut dengan grade 8.8. Dimana pada baut pengunci pelat yang patah memiliki kadar karbon sedikit lebih rendah yaitu 0,221 daripada standar grade 8.8 yaitu 0,25-0,55. Dan juga terdapat perbedaan dimana kandungan mangan sebesar 0,742 % yang tidak terdapat pada baut grade 8.8, kandungan mangan ini menaikkan kekerasan dan kekuatan pada baja. Nilai *tensile strength* pada baut grade 10.9 sebesar 1040 Mpa sedangkan pada grade 8.8 sebesar 900 Mpa. *Range* nilai kekerasan pada grade 10.9 antara 320 HV-380 HV sedangkan *range* nilai kekerasan pada baut grade 8.8 bernilai antara 255 HV – 355 HV.

Penggunaan baut 10.9 lebih mampu dalam menahan beban dan memiliki batas tegangan ijin sebesar 520 Mpa dibandingkan dengan baut grade 8.8 yang memiliki tegangan ijin 450 Mpa. Sedangkan tegangan yang ditanggung oleh baut pengunci 7,994 Mpa.

Pengamatan foto struktur mikro pada baut pengunci pelat *trunnion* diatas didapatkan bahwa bagian yang berwarna putih adalah fasa ferrit. Selain itu bagian yang berwarna gelap adalah bainit. Struktur mikro ini membuktikan bahwa baut pengunci mengalami perlakuan *quenching* dan *tempering*, dan sesuai dengan standar ISO 898-1 bahwa baut pengunci mengalami *quenching* dan *tempering* dengan temperatur tempering 425⁰c. Pada material baut pengunci pelat yang gagal dan baut pengunci pelat yang baru didapatkan morfologi butir yang berbeda. Pada material baut yang gagal memiliki morfologi butir bainit yang lebih panjang dibandingkan dengan bainit pada material baut yang baru. Hal ini menunjukkan adanya proses *strain hardening* pada material baut yang patah.



Berdasarkan uji kekerasan yang dilakukan pada penampang melintang terjadi kenaikan kekerasan pada permukaan baut pada baut pengunci yang patah yang ditunjukkan pada tabel 4.4. Pada daerah ujung permukaan baut menunjukkan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan pada bagian tengah baut, yang disebabkan pada bagian permukaan baut pengunci adalah bagian yang mengalami deformasi plastis berupa *wear* dan merupakan bagian yang menerima pembebanan pertama kali. Hal ini menunjukkan pada baut pengunci yang patah mengalami peningkatan kekerasan akibat deformasi plastis yang terjadi, hal ini dikarenakan efek *strain hardening* di bagian yang terkena deformasi.

Nilai kekerasan rata – rata yang didapatkan pada material yang patah sebesar 364,8 HV dan pada material yang baru sebesar 353,8 HV. Nilai kekerasan pada material baut yang patah sebesar 364,8 yang masih sesuai dengan standar ISO 898-1 grade 10.9 yaitu rentang nilai kekerasan antara 320-380 HV pada penampang melintang.

Pada penampang membujur, pada baut yang gagal terjadi kenaikan kekerasan yang signifikan dari titik yang jauh dari patahan hingga daerah yang dekat dengan patahan, ditunjukkan pada tabel 4.6, sedangkan pada baut pengunci baru ditunjukkan bahwa persebaran kekerasan dengan titik indentasi yang sama pada baut pengunci yang gagal memiliki persebaran kekerasan yang merata pada setiap titik indentasinya. Pada daerah dengan titik kekerasan tinggi mengindikasikan bahwa terdapat tegangan tinggi pada baut yang rentan terjadi pembentukan *crack* pada baut yang gagal akibat pembebanan yang diterima.

Pada analisa titik kritis yang dilakukan pada *software* inventor, dilakukan dengan batasan *fixed support* dan gaya yang diberikan diasumsikan sebesar 1809,79 N. Gaya diberikan dari arah atas menuju ke bawah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa terjadi pemusatan tegangan geser yang tinggi pada badan baut dibanding pada bagian baut pengunci yang lain, tegangan geser ini berfluktuasi dan berasal dari berat pelat *trunnion*, berat liner dan



material semen yang masuk pada *ball mill* yang berputar, ditunjukkan oleh daerah yang berwarna merah dan sesuai dengan kondisi sebenarnya dimana terjadi patahan dan *wear* yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 (a). Daerah badan baut yang terjadi pemusatan tegangan dengan daerah berwarna merah tersebut rentan terjadinya pembentukan *crack* dibandingkan dengan daerah lain pada baut pengunci.

Pada pengamatan fraktografi dapat diketahui bahwa *initial crack* merupakan retak awal yang ditandai dengan daerah permukaan yang terlihat terang dan halus yang terletak pada permukaan baut, hal ini terjadi karena permukaan pertama kali menerima beban terbesar yang berasal dari berat pelat *trunnion*, *liner* dan material terak yang masuk ke dalam *ball mill* dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan. Hal ini sesuai dengan pengujian kekerasan yang dilakukan pada penampang melintang dimana hasil nilai kekerasan pada ujung permukaan baut pengunci memiliki nilai kekerasan paling tinggi yang menunjukkan adanya konsentrasi tegangan.

Initial crack mengalami perambatan retak (*crack propagation*) dikarenakan pembebanan yang terus berlanjut, pada daerah *crack propagation* merupakan daerah penjaran retak dengan permukaan yang berwarna lebih gelap dan adanya perbedaan ketinggian yang terlihat secara makro bila dibandingkan dengan daerah *initial crack*. Pada daerah penjaran retak (*crack propagation*) ditunjukkan pada Gambar 4.5. Dimana pada daerah ini terjadi *fatigue zone* dimana terjadi pertumbuhan retak yang lambat. Pada daerah ini juga terlihat *beach mark* ditunjukkan pada tanda panah yang merupakan indikasi dari patah lelah. *Beach marks* atau *clam shells* ini menunjukkan arah perambatan retak dari daerah awal retak (*initial crack*). Pada daerah perambatan retak ini memiliki permukaan yang lebih halus daripada permukaan daerah *final crack*.

Retak terus menjalar hingga penampang yang tersisa tidak mampu menahan pembebanan yang terjadi, daerah ini disebut daerah patah akhir (*final fracture*), daerah patah akhir merupakan



daerah rambatan akhir dengan permukaan yang kasar dan dengan butir-butir yang kasar (*coarse grains*) dikarenakan terjadi perambatan patah yang sangat cepat akibat penampang yang tersisa tidak mampu menahan pembebanan yang terjadi. Terlihat juga kenaikan penampang yang lebih tinggi dari *crack propagation* dan *initial crack* pada daerah patah akhir.

Dari hasil pengamatan yang dilakukan dapat diketahui bahwa baut pengunci pelat *trunnion* mengalami *fatigue failure* akibat dari tegangan siklik yang diakibatkan pembebanan yang berasal dari berat pelat *trunnion*, *liner* dan material semen yang masuk ke dalam *ball mill* yang berputar pada baut pengunci pelat *trunnioni*. Terdapat *beach mark* yang tidak terlalu tampak mengindikasikan patah lelah yang menunjukkan pertumbuhan *crack* secara lambat.

Terjadinya kerusakan dapat diakibatkan oleh kondisi pelat *trunnion* dan mengalami deformasi plastik. Pada saat baut pengunci patah ditemukan pelat *trunnion* dalam keadaan bengkok dan tidak rata yang dapat menyebabkan persebaran tegangan yang tidak sama pada setiap baut dan menyebabkan pemusatan tegangan yang dapat mengakibatkan inisiasi *crack* pada baut sehingga menyebabkan baut pengunci pelat *trunnion* mengalami kegagalan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian percobaan yang telah dilakukan ada beberapa kesimpulan mengenai kegagalan baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill* antara lain sebagai berikut :

1. Faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan komponen baut pengunci pelat *trunnion* pada *ball mill* yaitu kegagalan lelah (*fatigue failure*).
2. Mekanisme kegagalan komponen baut pengunci pelat *trunnion* ini dapat terjadi dikarenakan, tegangan berulang yang berasal dari berat pelat *trunnion*, berat liner dan material semen yang masuk.
3. Untuk mengatasi kegagalan yaitu mengganti atau memperbaiki pelat *trunnion* yang sesuai dengan standar desain agar dapat mencegah terjadinya *initial crack*.

2. Saran

1. Melakukan penelitian lebih lanjut tentang desain pelat *trunnion*.
2. Mengganti atau memperbaiki pelat *trunnion* yang mengalami deformasi sesuai dengan standar alat.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- _____. (2002). *ASM Handbook Vol. 12 Fractography*. Material Park. Ohio. USA: ASM International.
- _____. (2002). *ASM Handbook Vol. 19 Fatigue and Fracture*. Material Park. Ohio. USA: ASM International.
- _____. (2002). *ASM Handbook Vol. 9 Metallography*. Material Park. Ohio. USA: ASM International.
- _____. (2010). *FLSmidth Ball Mill for Cement Grinding*. Bethlehem. USA: FLSmidth.
- _____. (2013). *FLSmidth Duodan Mill*. Run Nebraska: FLSmidth.
- Aji, W., & dkk. (2014). *Analisis Kegagalan Baut Pengikat Gearbox pada Lokomotif Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE)*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Akuan, A. (2007). *Kelelahan Logam*. Bandung: Departemen Teknik Metalurgi Universitas Jendral Ahmad Yani.
- Bramfitt, B. L. (1998). *Structure/ Property Relationships in Iron and Steels*. Bethlehem: ASM International.
- Callister, W. (2007). *Material Science and Engineering An Intoduction*. New York: John Wiley & Sons, inc.
- Colgelo, V. (1989). *Analysis of Metallurgical Failures Second Edition*. Singapore: John Wiley & Sons, Inc.
- Cottell, G. (1981). *Fatigue Failure, With Special Reference to Fracture Characteristics*. Unterweiser: American Society for Metals.
- Despratama, R. (2015). *Analisa Kegagalan Baut Dam Ring M30 pada OK Mill FLSmidth 42-4 Ditinjau dari Aspek Metalurgi*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Dieter, G. E. (1987). *Metalurgi Mekanik*. Jakarta: Erlangga.
- Griza, S. (2013). *The Effect of Bolt Length in the Fatigue Strength of M24X3 Bolt Studs*. Engineering Failure Analysis.

DAFTAR PUSTAKA

- _____. (2002). *ASM Handbook Vol. 12 Fractography*. Material Park. Ohio. USA: ASM International.
- _____. (2002). *ASM Handbook Vol. 19 Fatigue and Fracture*. Material Park. Ohio. USA: ASM International.
- _____. (2002). *ASM Handbook Vol. 9 Metallography*. Material Park. Ohio. USA: ASM International.
- _____. (2010). *FLSmidth Ball Mill for Cement Grinding*. Bethlehem. USA: FLSmidth.
- _____. (2013). *FLSmidth Duodan Mill*. Run Nebraska: FLSmidth.
- Aji, W., & dkk. (2014). *Analisis Kegagalan Baut Pengikat Gearbox pada Lokomotif Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE)*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Akuan, A. (2007). *Kelelahan Logam*. Bandung: Departemen Teknik Metalurgi Universitas Jendral Ahmad Yani.
- Bramfitt, B. L. (1998). *Structure/ Property Relationships in Iron and Steels*. Bethlehem: ASM International.
- Callister, W. (2007). *Material Science and Engineering An Intoduction*. New York: John Wiley & Sons, inc.
- Colgelo, V. (1989). *Analysis of Metallurgical Failures Second Edition*. Singapore: John Wiley & Sons, Inc.
- Cottell, G. (1981). *Fatigue Failure, With Special Reference to Fracture Characteristics*. Unterweiser: American Society for Metals.
- Despratama, R. (2015). *Analisa Kegagalan Baut Dam Ring M30 pada OK Mill FLSmidth 42-4 Ditinjau dari Aspek Metalurgi*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Dieter, G. E. (1987). *Metalurgi Mekanik*. Jakarta: Erlangga.
- Griza, S. (2013). *The Effect of Bolt Length in the Fatigue Strength of M24X3 Bolt Studs*. Engineering Failure Analysis.
- Hire Torque . (2015). *Preventing mechanism failures of bolts and bolted joints*. Retrieved from Hire Torque Corp Web:

- <https://www.hiretorque.co.uk/failure-modes-of-bolts-and-bolted-joints/>
- Hudgins, A., & James, B. (2014). **Fatigue of Threaded Fasteners**. In *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES*. ASM International.
- Ibrahim, A. (2013). *Analisa Kegagalan Baut Pengunci Tipe 3111020050*. Surabaya: Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kroschwitz, J. (1990). *Polymer Characterization and Analysis*. Canada: John Wiley & Sons Inc.
- Maurya, S. (2016). *Automotive Fastener Defects and Failure Analysis*. New Panvel: Department of Automobile Engineering Mes Pillai Institute of Information Technology. Engineering, Media Studies and Research.
- Meyer, C. (1997). *Causes and Recognition of Fatigue Failures*. Virginia: Virginia Tech Materials Science and Engineering.
- Nishida, S.-i. (1992). *Failure Analysis in Engineering Application*. Jordan Hill: Oxford Butterworth-Heinemann Ltd.
- PT Semen Indonesia TBK. (2017). *Profil Perusahaan: PT Semen Indonesia TBK*. Retrieved from PT Semen Indonesia TBK: <http://semenindonesia.com/profil-perusahaan/?lang=en>
- PT Semen Padang. (2006). *Profil : Produksi*. Retrieved from PT Semen Padang: <http://www.semenpadang.co.id/?mod=profil&kat=&id=4>
- R. Brooks, C. a. (2002). *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York: McGraw-Hill.
- Uehara, M. d. (2011). *Fatigue Properties of High Strength Bolts*. Brazil: Department of Material University of Campinas.
- Wiley, J. (n.d.). *Mechanical Engineer's Handbook: Material and Machine Design, Volume 1, Third Edition*. Pennsylvania: International Steel Group Inc.

Zhang, Y. J. (2014). **Investigation on Brittle Fracture Mechanism of a Grade E Cast Steel Knuckle.** In *Case Studies in Engineering Failure Analysis* (pp. 15-24).

LAMPIRAN

A. Perhitungan Tegangan

Diketahui :

1. Massa jenis bahan (ρ) : 7850 Kg/m^3
2. Massa Liner : 320 Kg
3. Massa terak : $59,72 \text{ Kg}$
4. Diameter baut pengunci : 24 mm

Volume pelat *trunnion* :

$$\begin{aligned} V_p &= [(\pi R_1^2 t) - (\pi R_2^2 t)] + [(\pi R_2^2 t) - (\pi R_3^2 t)] \\ &= [(\pi \cdot 1,5^2 \text{ m} \cdot 0,0486 \text{ m})] - (\pi \cdot 0,625^2 \text{ m} \cdot 0,0486 \text{ m}) + \\ &\quad [(\pi \cdot 0,625^2 \text{ m} \cdot 0,5086 \text{ m}) - (\pi \cdot 0,525^2 \text{ m} \cdot 0,5086 \text{ m})] \\ &= (0,343 \text{ m}^3 - 0,059 \text{ m}^3) + (0,624 \text{ m}^3 - 0,1835 \text{ m}^3) \\ &= 0,4675 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Menghitung Massa Pelat *Trunnion*

Massa = massa jenis. volume

$$\begin{aligned} m &= \rho \cdot V_p \\ &= 7850 \text{ Kg/m}^3 \cdot 0,4675 \text{ m}^3 \\ &= 3669,875 \text{ Kg} \\ &= 35964,775 \text{ N} \end{aligned}$$

Menghitung gaya total (F)

$$\begin{aligned} F_{\text{total}} &= F_{\text{pelat}} + F_{\text{liner}} + F_{\text{terak}} \\ &= 35964,775 \text{ N} + 50176 \text{ N} + 585,27 \text{ N} \\ &= 86726,045 \text{ N} \end{aligned}$$

F total ditanggung oleh 48 baut pengunci, gaya yang bekerja pada satu baut pengunci :

$$\begin{aligned} F_{\text{baut}} &= 86726,045 \text{ N}/48 \\ &= 1806,79 \text{ N} \end{aligned}$$

Tegangan geser pada baut :

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{F_{\text{baut}}}{D^2 \cdot \pi / 4} \\ &= \frac{1806,79 \text{ N}}{0,024^2 \cdot \pi / 4} \\ &= 3,997 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Safety Factor :

$$\begin{aligned}Sf &= \tau \cdot 2 \\ &= 3,997 \text{ Mpa} \cdot 2 \\ &= 7,994 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau &< \tau_y \\ \mathbf{7,994 \text{ MPa} < 520 \text{ MPa}}\end{aligned}$$

B. Analisa OES (Optical Emission Spectrometry) Komposisi kimia

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT


OES Chemical Results

Sample ID : 1 Material : BOLT M24
Customer : Sdr. INGGIL HANIDYA (T. MATER) Dimension : -
Lab-no. : LAB. UJI BAHAN Heat-no. : -
Operator : MUHARROR Ka. Laboratorium : M. THORIQ W.
Date : 16 MARET 2017

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	97.6	0.229	0.242	0.745	0.0186	0.0073	0.928	0.0069
2	97.7	0.218	0.226	0.746	0.0178	0.0065	0.935	0.0079
3	97.7	0.216	0.221	0.735	0.0175	0.0068	0.923	0.0073
Ave	97.7	0.221	0.230	0.742	0.0180	0.0069	0.929	0.0074
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0181	0.0219	0.0079	0.0189	0.0068	0.0049	0.0061	< 0.0010
2	0.0182	0.0231	0.0074	0.0131	< 0.0010	0.0056	0.0053	< 0.0010
3	0.0177	0.0201	0.0076	0.0129	0.0045	0.0058	0.0044	0.0045
Ave	0.0180	0.0217	0.0076	0.0143	0.0037	0.0054	0.0053	0.0015
	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
1	0.0024	0.0027	0.0008	0.0004	0.0037	< 0.0001	0.0055	0.0088
2	< 0.0010	0.0040	0.0007	0.0005	0.0035	< 0.0001	0.0024	0.0094
3	< 0.0010	0.0020	0.0006	0.0002	0.0064	= 0.0001	0.0044	0.0080
Ave	0.0011	0.0032	0.0007	0.0003	0.0042	< 0.0001	0.0041	0.0087
	N	Se	Sb	Ta				
1	0.0113	0.0071	< 0.0010	< 0.0040				
2	< 0.0030	0.0059	< 0.0010	< 0.0040				
3	0.0086	0.0043	0.0077	< 0.0040				
Ave	0.0066	0.0058	0.0026	< 0.0040				

Kampus ITS Sukolilo
Teknik Kimia

Examined by,
PPNS

(MUHARROR)

C. Standar ISO 898-1 (Chemical Composition)

Table 2 — Steels

Property class	Material and heat treatment	Chemical composition limits (cast analysis, %) ^a					Tempering temperature °C min.
		C min.	C max.	P max.	S max.	B ^b max.	
4.6 ^{c, d}	Carbon steel or carbon steel with additives	—	0,55	0,050	0,060	Not specified	—
4.8 ^d		—	0,55	0,050	0,060		
5.6 ^c		—	0,55	0,050	0,060		
5.8 ^d		—	0,55	0,050	0,060		
6.8 ^d		—	0,55	0,050	0,060		
8.8 ^f	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr) quenched and tempered	0,15 ^e	0,40	0,025	0,025	0,003	425
	or Carbon steel quenched and tempered	0,25	0,55	0,025	0,025		
	or Alloy steel quenched and tempered ^g	0,20	0,55	0,025	0,025		
9.8 ^f	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr) quenched and tempered	0,15 ^e	0,40	0,025	0,025	0,003	425
	or Carbon steel quenched and tempered	0,25	0,55	0,025	0,025		
	or Alloy steel quenched and tempered ^g	0,20	0,55	0,025	0,025		
10.9 ^f	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr) quenched and tempered	0,20 ^e	0,55	0,025	0,025	0,003	425
	or Carbon steel quenched and tempered	0,25	0,55	0,025	0,025		
	or Alloy steel quenched and tempered ^g	0,20	0,55	0,025	0,025		
12.9 ^{f, h, i}	Alloy steel quenched and tempered ^g	0,30	0,50	0,025	0,025	0,003	425
12.9 ^{f, h, i}	Carbon steel with additives (e.g. Boron or Mn or Cr or Molybdenum) quenched and tempered	0,28	0,50	0,025	0,025	0,003	380

^a In case of dispute, the product analysis applies.

^b Boron content can reach 0,005 %, provided that non-effective boron is controlled by addition of titanium and/or aluminium.

^c For cold forged fasteners of property classes 4.6 and 5.6, heat treatment of the wire used for cold forging or of the cold forged fastener itself may be necessary to achieve required ductility.

^d Free cutting steel is allowed for these property classes with the following maximum sulphur, phosphorus and lead contents: sulphur 0,34 %; phosphorus 0,11 %; lead 0,35 %.

^e In case of plain carbon boron steel with a carbon content below 0,25 % (cast analysis), the minimum manganese content shall be 0,6 % for property class 8.8 and 0,7 % for 9.8 and 10.9.

^f For the materials of these property classes, there shall be a sufficient hardenability to ensure a structure consisting of approximately 90 % martensite in the core of the threaded sections for the fasteners in the "as-hardened" condition before tempering.

^g This alloy steel shall contain at least one of the following elements in the minimum quantity given: chromium 0,30 %, nickel 0,30 %, molybdenum 0,20 %, vanadium 0,10 %. Where elements are specified in combinations of two, three or four and have alloy contents less than those given above, the limit value to be applied for steel class determination is 70 % of the sum of the individual limit values shown above for the two, three or four elements concerned.

^h A metallographically detectable white phosphorus enriched layer is not permitted for property class 12.9/12.9. It shall be detected by a suitable test method.

ⁱ Caution is advised when the use of property class 12.9/12.9 is considered. The capability of the fastener manufacturer, the service conditions and the wrenching methods should be considered. Environments may cause stress corrosion cracking of fasteners as processed as well as those coated.

D. Standar ISO 898-1 (Chemical Composition)

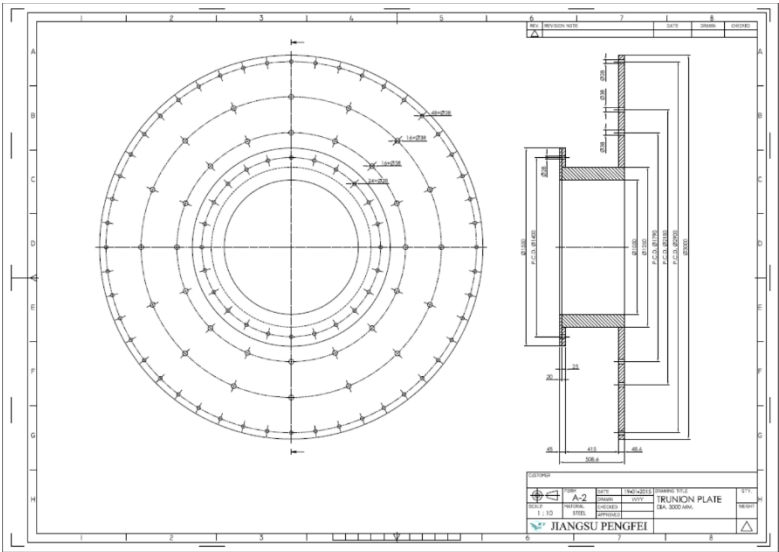
No.	Mechanical or physical property	Property class										
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9/ 12.9	
							$d \leq 16$ mm ^a	$d > 16$ mm ^b	$d \leq 16$ mm			
1	Tensile strength, R_m , MPa	nom. ^c	400		500	600	800		900	1000	1200	
		min.	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220
2	Lower yield strength, R_{eL} ^d , MPa	nom. ^c	240	—	300	—	—	—	—	—	—	
		min.	240	—	300	—	—	—	—	—	—	—
3	Stress at 0,2 % non-proportional elongation, $R_{p0.2}$ ^e , MPa	nom. ^c	—	—	—	—	640	640	720	900	1080	
		min.	—	—	—	—	640	660	720	940	1100	
4	Stress at 0,0048 d non-proportional elongation for full-size fasteners, R_{pf} ^f , MPa	nom. ^c	—	320	—	400	480	—	—	—	—	
		min.	—	340 ^e	—	420 ^e	480 ^e	—	—	—	—	
5	Stress under proof load, S_p ^f , MPa Proof strength ratio $\frac{S_{p, nom}/R_{eL, min}}{S_{p, nom}/R_{p0.2, min}}$ or $\frac{S_{p, nom}/R_{pf, min}}{S_{p, nom}/R_{pf, min}}$	nom.	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970
			0,94	0,91	0,93	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,88
6	Percentage elongation after fracture for machined test pieces, A , %	min.	22	—	20	—	—	12	12	10	9	8
7	Percentage reduction of area after fracture for machined test pieces, Z , %	min.	—					52	48	48	44	
8	Elongation after fracture for full-size fasteners, A_f (see also Annex C)	min.	—	0,24	—	0,22	0,20	—	—	—	—	—
9	Head soundness	No fracture										

No.	Mechanical or physical property	Property class										
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9/ 12.9	
							$d \leq 16$ mm ^a	$d > 16$ mm ^b	$d \leq 16$ mm			
10	Vickers hardness, HV $F \geq 98$ N	min.	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385
		max.	220 ^g				250	320	335	360	380	435
11	Brinell hardness, HBW $F = 30 D^2$	min.	114	124	147	152	181	238	242	276	304	366
		max.	209 ^g				238	304	318	342	361	414
12	Rockwell hardness, HRC	min.	67	71	79	82	89	—				
		max.	95,0 ^g				99,5	—				
	Rockwell hardness, HRC	min.	—				22	23	28	32	39	
		max.	—				32	34	37	39	44	
13	Surface hardness, HV 0,3	max.	—				h			h, i	h, j	
14	Height of non-decarburized thread zone, E , mm	min.	—				$1/2 H_1$			$2/3 H_1$	$3/4 H_1$	
	Depth of complete decarburization in the thread, G , mm	max.	—				0,015					
15	Reduction of hardness after retempering, HV	max.	—				20					
16	Breaking torque, M_B , N.m	min.	—				in accordance with ISO 898-7					
17	Impact strength, K_v ^{k, l} , J	min.	—	27	—		27	27	27	27	m	
18	Surface integrity in accordance with	ISO 6157-1 ⁿ										ISO 6157-3

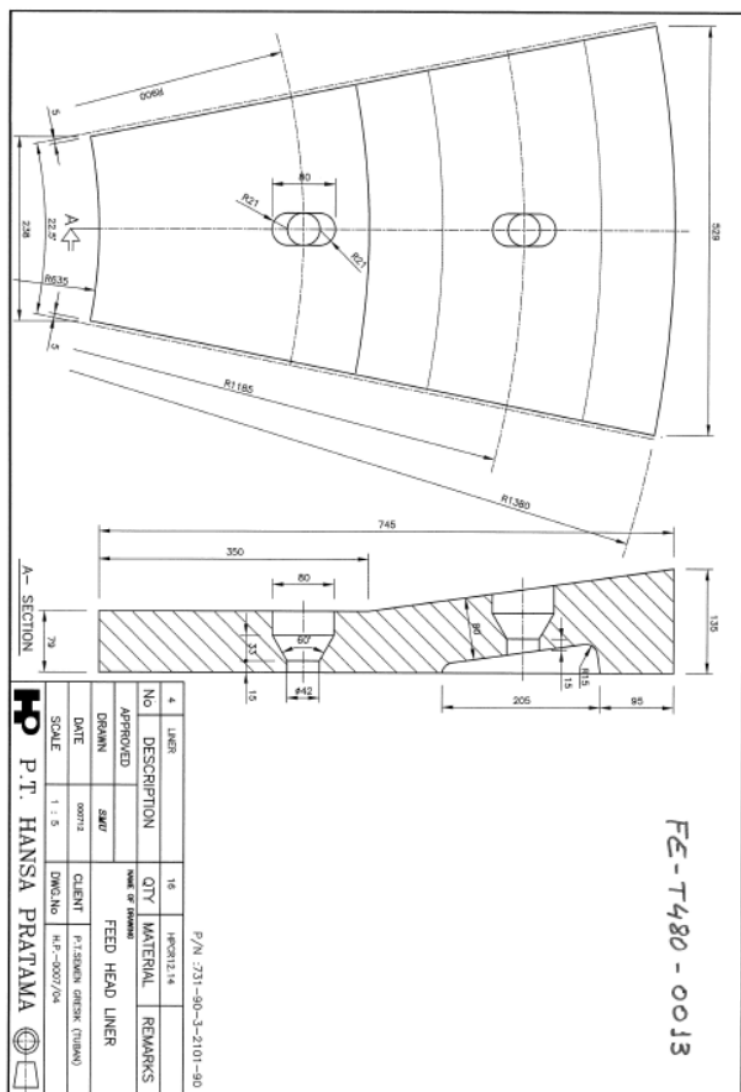
1. Gambar Mesin Ball Mill



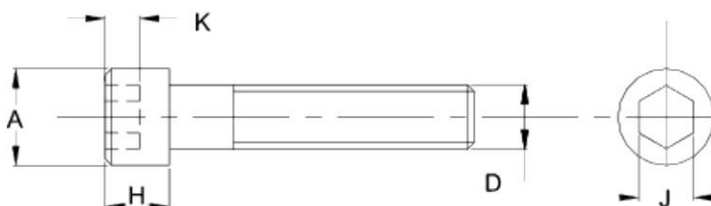
2. Gambar Desain Pelat Trunnion



3. Gambar Desain Liner



4. Gambar Dimensi Baut Pengunci



Nominal	Thread Pitch	Hex Socket Size	Body Diameter and Head height		Head Diameter		Socket Length
Size	Pitch		Max	Min	Max	Min	
		J	D / H		A		K
M3	0.5	2.50	3.00	2.86	5.50	5.20	1.3
M4	0.70	3.00	4.00	3.82	7.00	6.64	2.00
M5	0.8	4.00	5.00	4.82	8.50	8.14	2.70
M6	1.0	5.00	6.00	5.82	10.00	9.64	3.30
M8	1.25	6.00	8.00	7.78	13.00	12.57	4.3
M10	1.5	8.00	10.00	9.78	16.00	15.57	5.50
M12	1.75	10.00	12.00	11.73	18.00	17.57	6.60
M16	2.0	14.00	16.00	15.73	24.00	23.48	8.80
M20	2.5	17.00	20.00	19.67	30.00	29.48	10.70
M24	3.0	19.00	24.00	23.67	36.00	35.38	12.90

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Inggil Hanidya yang dilahirkan di Karanganyar pada tanggal 21 Agustus 1996. Penulis pernah menjalankan pendidikan formal di SDN 003 Malangaten, SMPN 01 Kebakkramat Kab, Karanganyar dan SMAN 01 Karanganyar. Penulis merupakan mahasiswa aktif Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS tahun masuk 2013.

Selama menjalankan pendidikan di kampus ITS Surabaya, penulis berpartisipasi aktif dalam organisasi mahasiswa himpunan mahasiswa teknik material dan metalurgi (HMMT) FTI -ITS sebagai staff divisi event BSO MTC pada tahun 2013-2014 dan kepala divisi event pada tahun 2014-2015.

Alamat penulis saat ini adalah RT 03/01 Jelok, Malangaten, Kebakkramat, Karanganyar. Nomor telepon yang dapat dihubungi adalah 081236061548 atau alamat email inggilhanidya13@gmail.com.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)